وحوش أينشتاين

حياة الثقوب السوداء وتاريخها



كريس إمبي

«كانت الثقوب السوداء في الأصل محض شطحات من الخيال النظري، وكانت عصيّة الفهم حتى على المخضرمين من أهل الفيزياء. وفي هذا الكتاب يُبيّن كريس إمبي كيف وضعها علم الفلك الحديث في بؤرة التركيز، ويوضح كم نتعلم عن تلك الوحوش في كل عام يمضي».

شون كارول، مؤلف كتاب:

The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself

وحوش أينشتاين

وحوش أينشتاين
Einstein’s monsters

كريس إمبي
Chris Impey

الطبعة الأولى: ٢٠٢٠م
رقم إيداع: ٢٠١٩/٢٨٥٧٨
تدمك: ٩٧٨٩٧٧٨٥٣٦٨٨١
٣٢٨ ص، ١٦×٢٣سم

جمهورية مصر العربية
٦٦ مساكن الرماية، الدور الثالث - شقة ١٠، الهرم، الجيزة

+201099596575
bookmania2017@gmail.com
Bookmania - بوك مانيا
book_mania2017

تصميم وتنفيذ
شركة خطوة

وحوش أينشتاين

حياة الثقوب السوداء وتاريخها

مكتبة | 700
سُر مَن قرأ

تأليف

كريس إمبي

ترجمة

أحمد عبده

مراجعة

شهاب الدين أحمد يسن



بوك مانيا

المحتويات

الجزء الثاني: ماضي الثقوب السوداء وحاضرها ومستقبلها

إلى دينا،

حبِّي ومصدر إلهامي.

أَخفي أيتها النجوم ضوءَك، حتى لا ينكشف
الستار عن رغباتي السوداء الدفينة.

ويليام شكسبير

ماكبث، الفصل الأول، المشهد الرابع

شكر وتقدير

إنني مُمتن لزوجتي دينا لدعمها كلَّ جهودي الإبداعية، كما أوجِّه الشكر لوكيلتي آنا جوش، على توجيه كتاباتي نحو مسارات مثمرة، ولقد سعدتُ بالعمل مع توم ماير، محرر كُتبي في دار نورتون للنشر، كما أقدِّر تعليقات سارة بولينج على المسودة الأولى، كذلك أعبِّر عن شكري لمركز آسبن للفيزياء؛ لتوفيره جوًّا من الهدوء والتحفيز الفكري الباعثين على الكتابة العلمية، كما أنني استفدت من محادثات عديدة عن الثقوب السوداء أجريتها مع زملاء لي في جامعة أريزونا وجميع أنحاء العالم، فحماسهم لا يفتأ يذكِّرني بأن الكون مكان رائع، وأنه لشرفٌ أن يكون المرء عالمًا ومعلمًا وأن يشارك هذا الحماس مع الآخرين.

مكتبة
t.me/t_pdf

مقدمة

إن الثقوب السوداء هي أكثر موجودات الكون شهرةً وإن كانت أكثرها تعصيًا على الفهم كذلك؛ إذ يستخدم العوام هذا المصطلح للإشارة إلى أي كيان يمتص كل شيء حوله، كما أنها تظهر في الأفلام وروايات الخيال العلمي؛ كونها أحد خيارات الثقافة الشعبية، ودائمًا يرمز الثقب الأسود لشيء غامض شرير؛ لذا أسميها «وحوش أينشتاين» مجازًا، فهي قوية ولا تخضع لأي سيطرة. لم يصنع أينشتاين الثقوب السوداء، لكنه وضع أفضل نظرية للجاذبية نستطيع من خلالها فهم هذه الثقوب السوداء.[1]

إن ما يعتقد معظم الناس أنهم يعرفونه عن الثقوب السوداء خاطئ؛ فهي ليست مكانس كونية تمتص كل شيء في المناطق المجاورة لها، وإنما تغير شكل الزمكان القريب جدًّا من أفق حدثها. تمثل الثقوب السوداء جزءًا صغيرًا من كتلة الكون، وأقربها إلينا يبعد عنَّا مئات الملايين من الأميال، ومن المستبعد أن تُستخدَم في السفر عبر الزمن أو زيارة أكوان أخرى. كما أن الثقوب السوداء ليست حتى سوداء، وكذلك فهي تبعث كميات من الجسيمات والإشعاع، ومعظمها يكون جزءًا من أنظمة ثنائية حيث ترتفع درجة حرارة الغاز الساقط فيها ويتوهج بشدة، وليست الثقوب السوداء خطِرة بالضرورة، إذ يمكن أن تسقط في الثقب الأسود الموجود في مركز معظم المجرَّات ولا تشعر بشيء، رغم أنك لن تستطيع أبدًا أن تخبر أحدًا بما شاهدته.

يمثل هذا الكتاب مقدمة تعريفية عن الثقوب السوداء، الكبيرة منها والصغيرة. والثقوب السوداء خادعة في بساطتها، إذ إن العمليات الرياضية اللازمة لفهمها معقدة للغاية، وسنلتقي عبر دفتي الكتاب بعلماء كشفوا الثقوب السوداء للبشرية، منهم مُنظِّرون تجرأوا على الحلم بالنجوم المظلمة منذ مئات السنين، ومنهم من صارعوا النسبية العامة، وما وراءها.

لا يمكن فهم الثقوب السوداء دون نظرية النسبية العامة لأينشتاين، التي صاغها منذ قرن مضى، والتي تنصُّ على أن المادة تقوم بتغيير شكل الزمكان، وفي الحالة القصوى حيث تكون الكتلة شديدة الكثافة، «تقتطع» منطقة معينة من الفضاء وتُعزَل

عن بقية الكون، ولا يمكن لأي شيء أن يهرب منها، ولا حتى الضوء. هذا هو الثقب الأسود، ولكن حتى أينشتاين نفسه كان مُتشككًا في حقيقتها، ولم يكن متفردًا في ذلك؛ فقد شكَّك العديد من الفيزيائيين البارزين في وجودها.

لكنها موجودة، فقد تجمعت أدلَّة منذ أربعين عامًا على أنه عندما تموت النجوم الضخمة، فلا توجد قوة في الطبيعة تستطيع مقاومة انهيار الجاذبية الحادثة في لُبِّها؛ حيث تنكمش كرة غازية حجمها عشرة أضعاف حجم الشمس، إلى جسم مُظلم بحجم مدينة صغيرة. واتضح مؤخرًا أن مركز كل مجرَّة يحتوي على ثقب أسود ضخم، ربما تزيد كتلته بمعامل مليار عن كتلة الشمس.

عندما ندرس أماكن وجود الثقوب السوداء، سنتعرَّف على الأنظمة الثنائية، حيث ترقص الثقوب السوداء رقصة جاذبية ثنائية مع نجم عادي، وسندرك أن أفضل دليل على وجود أي ثقب أسود يقع في مركز مجرَّتنا، حيث تتجمهر عشرات النجوم كالنحل الغاضب حول جسم مُظلم تبلغ كتلته ٤ ملايين ضعفٍ لكتلة الشمس. وعندما تصحو الثقوب السوداء الضخمة التي تحتضنها كل المجرَّات من سُباتها وتبدأ في البحث عمَّا يغذيها، يمكن رؤيتها من مسافات تبلغ مليارات السنين الضوئية، فمحركات الجاذبية تلك هي أقوى مصادر الإشعاع في الكون.

في الآونة الأخيرة، تعلَّم الفيزيائيون الرؤية عبر «مناظير الجاذبية» من خلال رصد موجات الجاذبية، فعندما يصطدم اثنان من الثقوب السوداء، فإنهما يطلِقان سلسلة من التموُّجات في الزمكان، والتي تتسارع نحو الخارج بسرعة الضوء وتحتوي على معلومات عن هذا الصدام العنيف. لقد فُتِحَت نافذة جديدة على الثقوب السوداء وعلى جميع الحالات التي تكون فيها الجاذبية قوية ومتغيرة، وتقدم موجات الجاذبية برهانًا لا لبسَ فيه – إذا كنا ما زلنا نحتاج لبرهان – على أن الطبيعة هي التي تخلق الثقوب السوداء، وكل خمس دقائق يندمج اثنان من الثقوب السوداء في مكان ما في الكون، مصدرِيْن موجات جاذبية في الفضاء.

إننا بعيدون كلَّ البعد عن الإحاطة بكل ما يتعلق بالثقوب السوداء، فهي تواصل إدهاشنا وإسعادنا، وتسمح الثقوب السوداء باختبار النسبية العامة بطرق جديدة، ولا أحد يعرف ما إذا كانت هذه الاختبارات ستؤكد النظرية أم تؤدي إلى دحضها، وهناك جدل قوي حول نقص المعلومات المتعلقة بالثقوب السوداء، وما إذا كانت هذه المعلومات مشفَّرة بطريقة أو أخرى في أفق الحدث، ويأمل المُنظِّرون أن تكون الثقوب السوداء

حدثًا يمكن من خلاله التحقق من نظرية الأوتار، وفي النهاية الوصول إلى مسعى أينشتاين من أجل توحيد ميكانيكا الكمِّ والنسبية العامة.

ينقسم هذا الكتاب إلى جزأين؛ يغطي الأول الأدلة التي نملكها حول وجود الثقوب السوداء، وتشير هذه الأدلة إلى مجموعة من الثقوب السوداء تتراوح أحجامها بين الثقوب السوداء التي تكافئ حجم الشمس إلى الثقوب السوداء فائقة الضخامة التي تصل كتلتها إلى كتلة مجرَّة صغيرة. ويشرح الجزء الثاني كيف تولد الثقوب السوداء وتموت، كما يشرح أيضًا كيف تتحدى الثقوب السوداء نظرياتنا بشأن الطبيعة، وإضافة إلى قصص الثقوب السوداء، هناك قصص شخصية، بما في ذلك بعض القصص التي تخصني، كتذكير بأنه رغم موضوعية العلم، فإن العلماء بشر من لحم ودم، لهم عيوب بقية البشر ونقائصهم ذاتها، ونظرًا لأنني أغطِّي موضوعًا سريع التطور، ربما لا تصمد بعض النتائج المعروضة هنا أمام اختبار الزمن، وأتحمل وحدي أي أخطاء أو سهو، أو إساءة تعبير في هذا الكتاب.

يمكننا أن نتصور أن المخلوقات الذكية في تريليونات العوالم الصالحة للحياة في الكون، قد استنتجت وجود الثقوب السوداء، وربما تعلَّم بعضها كيفية خلق هذه الثقوب واستغلال قوتها، إن الجنس البشري هو جنس شاب، لكن له أن يفخر كونه عضوًا في ذلك النادي الذي يجمع من هم على دراية بالثقوب السوداء.

كريس إمبي

توسان، أريزونا

أبريل ٢٠١٨



الجزء الأول

أدلة على وجود الثقوب السوداء، صغيرها وكبيرها

كيف توصل العلماء إلى مفهوم الثقب الأسود؟ في هذا الجزء من الكتاب سنرى كيف بدأت التخمينات بعد طرح نيوتن نظريته للجاذبية، وانتشارها بعد أن أوضح أينشتاين نتائج نظريته النسبية العامة. واليوم نعرف أن الثقوب السوداء لها مكونان رئيسيان: «أفق الحدث»، الذي يعمل كحاجز معلوماتي، و«التفرد الجذبوي»، أو النقطة المركزية لكثافة الكتلة اللانهائية. لكن العديد من الفيزيائيين البارزين، ومنهم أينشتاين نفسه، لم يستسيغوا هذه الحالة الغريبة من المادة، في حين أوضح آخرون أنه من الممكن لقلب نجم ضخم أن ينضغط ليتحول إلى جسم من الكثافة بمكان ألا تستطيع الجسيمات والإشعاعات الهروب منه.

لو كان المُنظِّرون قد وثقوا في أناقة الحسابات الرياضية الخاصة بالنسبية العامة، لَمَا وجدوا أي باعث للشك في وجود الثقوب السوداء، لكن العلم تجريبي؛ لذا فقد عمل علماء الفلك على تعقُّب طريدتهم المراوغة. لكن لم يستطع الباحثون رؤية «القرص المُزوِّد» الساخن وزوج النفاثات الراديوية التي تتشكَّل عندما يمتص الثقب الأسود الغاز من الكون المحيط به، إلا بعد استحداث علم فلك الأشعة السينية بعد عقد انقضى على وفاة أينشتاين. إن العثور على النجوم المظلمة والميتة أمر صعب، فحتى بعد خمسين عامًا من العمل، لم نجد سوى بقايا ثلاثين نجمًا فقط، ثَبُتَ أنها ثقوب سوداء بدرجة تتجاوز أي شكوك منطقية. وهذه هي أقرب الأمثلة للمجموعة التي نتوقع وجودها، والتي يبلغ عددها نحو ١٠ ملايين ثقب أسود متناثرين في درب التبانة. ومع تراكم هذه الأدلة بشِقِّ الأنفس، اكتشف علماء الفلك اكتشافًا مدهشًا مفاده أن الثقوب السوداء الضخمة تحوم في مراكز المجرَّات، وعندما تمتص هذه الثقوب السوداء المادة، تصبح أكثر الأجسام لمعانًا في الكون.

الفصل الأول
أعماق الظلام

العلماء متفائلون، فهم يتأثرون بما للنظريات على غرار النسبية ونظرية الانتقاء الطبيعي، من قدرة على التأثير والتنبؤ، كما يؤمنون أن التقدم السريع في الفيزياء وعلم الفلك وعلم الأحياء الحادث خلال العقود القليلة الماضية سيستمر، وأن العلم سيبسط سطوته التفسيرية إلى أبعد الحدود في العالم الطبيعي.

ولكن ماذا لو اصطدم هذا الطموح بعقبة كؤود؟ ماذا لو كان الكون يأوي أشياء تقاوم أعيننا المتطفلة، أشياء مشفَّرة؟ بل الأسوأ من ذلك، ماذا لو كانت أفضل نظرياتنا الفيزيائية قد تنبأت بهذه الكيانات الغامضة، ولكن اتضح لهذه الكيانات خصائص تُلقي بظلال الشك على تلك النظريات ذاتها؟ مرحبًا بكم في عالم الثقوب السوداء.

رجل دين إنجليزي يتخيَّل النجوم المظلمة

كان جون ميشيل - بحسب معاصريه - «رجلًا قصيرًا إلى حدٍّ ما، ذا بشرة سوداء ممتلئ الجسم»، وقد أمضى معظم حياته قِسِّيسًا في كنيسة في بلدة صغيرة بشمال إنجلترا، لكن المفكرين المشهورين في تلك الفترة أمثال جوزيف بريستلي وهنري كافنديش وبنجامين فرانكلين، كانوا يطرقون بابه؛ لأن ميشيل كان أيضًا عالِمًا موسوعيًّا بارعًا، لكن تواضعه وحياته الهادئة كرجل دين جعلا التاريخ يتجاهله.

درس ميشيل الرياضيات في جامعة كامبريدج، والتي درَّس بعد ذلك فيها الرياضيات واللغتين اليونانية والعبرية، كما أسس مجال علم الزلازل بعد أن أشار إلى أن الزلازل تنتقل كموجات عبر الأرض، وهي الفكرة التي ضمنت له مكانًا في الجمعية الملكيَّة. كان ميشيل هو الذي ابتكر المُعدَّات التجريبية التي استخدمها هنري كافنديش لاحقًا لقياس ثابت الجاذبية، والذي هو قيمة أساسية في جميع حسابات الجاذبية، كما كان أول من استخدم الأساليب الإحصائية في علم الفلك، مشيرًا إلى أن العديد من

الأزواج ومجموعات النجوم في السماء لا بد أنها مترابطة فيزيائيًّا وليست مصفوفة على هذه الصورة بمحض الصدفة.[1]

لكن أقوى الأفكار التي قدمها رجل الدين هذا كانت إشارته إلى أن بعض النجوم قد يمتلك جاذبية قوية لدرجة تمنع حتى الضوء من الإفلات منه، وقدَّم هذه الفكرة في ورقة بحثيَّة عام ١٧٨٤ بعنوان «على طريق اكتشاف بُعد وأحجام النجوم الثابتة، وما إلى ذلك، كنتيجة لبطء سرعة ضوئها، في حالة إذا ما تعين حدوث هذا التباطؤ، ويجب الحصول على بيانات أخرى من عمليات الرصد، والتي ستكون أكثر ضرورية لهذا الغرض».[2]

يوضح هذا العنوان الطويل جوهر هذه الورقة البحثية على نحو تام، فَهِمَ ميشيل فكرة سرعة الإفلات وحقيقة أنها تتحدد عن طريق كتلة النجم وحجمه، كما أنه سار على خطى إسحاق نيوتن في الإيمان بأن الضوء هو مجموعة من الجسيمات، ووافقه في أن جاذبية النجم تبطئ من سرعة الضوء. وتساءل عمَّا يمكن أن يحدث إذا كان النجم فائق الضخامة وكانت جاذبيته قوية لدرجة أن سرعة الإفلات فيها تساوي سرعة الضوء، وافترض وجود العديد من «النجوم المظلمة» التي كانت غير قابلة للرصد لأن الضوء لم يستطع الإفلات منها.[3]

كان منطق ميشيل معيبًا، وكان هذا لأنه كان يستخدم نظريات نيوتن الفيزيائية. في عام ١٨٨٧ أثبت ألبرت ميكلسون وإدوارد مورلي أن الضوء يتحرك دائمًا بالسرعة نفسها، بغضِّ النظر عن حركة الأرض.[4]

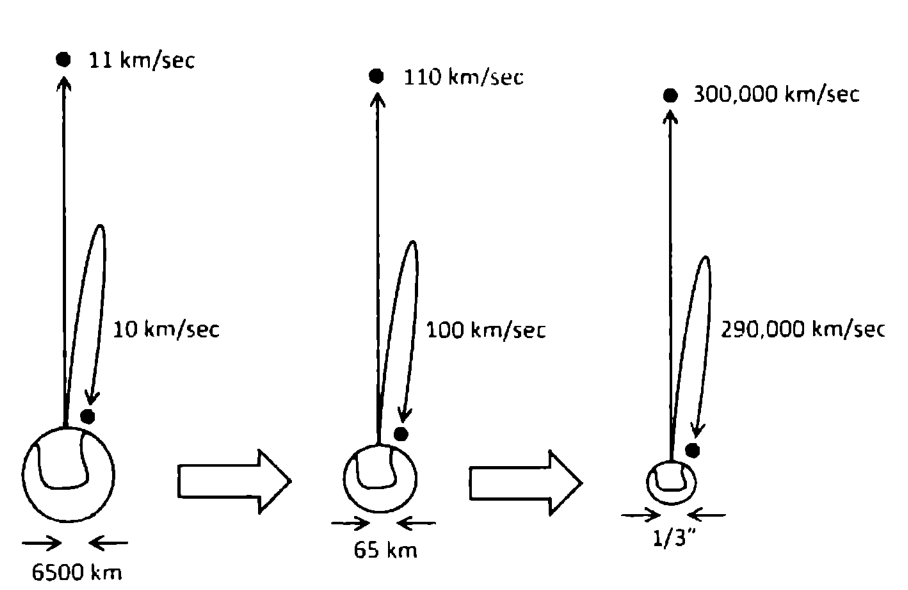
وفي عام ١٩٠٥، جعل أينشتاين هذه النتيجة فرضية نظريته النسبية الخاصة، مشيرًا إلى أن سرعة الضوء لا تعتمد على قوة الجاذبية الداخلية، كما أخطأ ميشيل أيضًا عندما تخيَّل حجم النجوم المظلمة أكبر من حجم الشمس بـ ٥٠٠ مرة مع كونها بالكثافة نفسها، وليس هناك نجوم بهذه الضخامة، وإنما تتحقق التأثيرات القصوى للجاذبية فقط عندما تكون الكثافة عالية، وهذا يحدث عندما ينضغط نجم مثل الشمس إلى حجم صغير.

إسهام عالم رياضيات فرنسي عظيم

بعد مرور اثني عشر عامًا على نظرية ميشيل عن النجوم المظلمة، كتب عالم الرياضيات الفرنسي بيير سيمون لابلاس حول الموضوع نفسه في كتابه

"*Exposition of the system of the world*". كان لابلاس أكثر شهرة من ميشيل، فقد كان رئيسًا للمعهد الفرنسي، وعمل مستشارًا لنابليون، ونال لقب كونت ثم صار بعد ذلك ماركيزًا، وكما فعل ميشيل درس لابلاس اللاهوت؛ فقد كان من عائلة متديِّنة، لكن نداء الرياضيات كان أكبر وقعًا في نفسه من نداء الرب.

على ما يبدو لم يكن لابلاس عالمًا بأعمال ميشيل، ففي أطروحة من مجلَّدَيْن في مجال علم الفلك، ذكر لابلاس اختصارًا فكرة النجوم المظلمة في معرض تناوله لجاذبية نجم افتراضي أكبر بكثير من الشمس، فقال: «لذلك من الممكن أن تكون أكبر الأجسام المضيئة في الكون غير مرئية لهذا السبب». تحداه أحد زملائه لتقديم دليل رياضي على نظريته تلك، وقد فعلها عام ١٧٩٩، أي بعد ثلاث سنوات.[٥] لكن عمله كان معيبًا كأعمال ميشيل للسبب نفسه، كانت المادة الأكثر كثافة المعروفة في ذلك الوقت



شكل ١: مفهوم الثقب الأسود طبقًا للجاذبية النيوتنية. سرعة الإفلات من الأرض تساوي ١١ كم/ثانية، وأي جسم ينطلق بهذه السرعة سوف يفلت من جاذبية الأرض، ولو تقلصت الأرض بمعامل قدره ١٠٠، فإن سرعة الهروب ترتفع إلى ١١٠ كم/ثانية. وسينشأ ثقب أسود إذا انضغطت الأرض إلى كرة نصف قطرها ١/٣ بوصة، حيث تكون سرعة الإفلات تساوي سرعة الضوء.

«جون د. نورتون/جامعة بيتسبرج»

هي الذهب، فقد كان أكثر كثافة من الأرض بخمس مرات وأكثر كثافة من الشمس بأربع عشرة مرة، ربما كان من الصعب على العلماء أن يتصوروا حالات للمادة أكثر كثافة بملايين المرات، نحتاجها لفهم الثقب الأسود حاليًّا (شكل ١). فيما بعد حذف لابلاس أي إشارة إلى النجوم المظلمة من الطبعات اللاحقة لكتابه، ربما لأن توماس يونج أوضح في عام ١٧٩٩ أن الضوء يتصرف كموجة، وليس من المحتمل أن تستطيع الجاذبية إبطاء موجة.

لم يكن لمفهوم الثقوب السوداء أن يتضح بشكل كامل دون نظرية جديدة للجاذبية، فنظرية نيوتن بسيطة تنصُّ على كون الفضاء أملَس خطيًّا يمتد بلا حدود في كل الاتجاهات. والوقت سَلِسٌ خطيٌّ ويتدفق إلى المستقبل اللامحدود، المكان والزمان منفصلان ومستقلان. وتتحرك النجوم والكواكب عبر الفضاء الخالي تحكمها قوة تعتمد على كتلها ومقدار المسافات بينها، وهذا هو عالم نيوتن الأنيق.[٦]

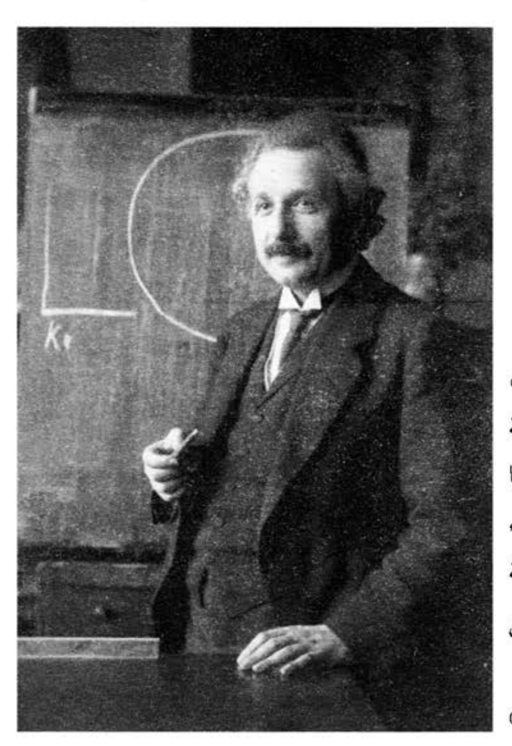
قال ريتشارد ويستفول - كاتب سيرة نيوتن والعالم الفذ - «إن النتيجة النهائية لدراستي لنيوتن جعلتني أقتنع بأنه رجل يعلو على أي مقياس؛ فإنني أراه مختلفًا عن الآخرين أيما اختلاف، واحد من بضعة عباقرة كبار شكلوا فئات المعرفة البشرية، رجل لا يمكن اختزاله من خلال المعايير التي نفهم من خلالها بقية البشر».[٧]

مع ذلك، حتى عقل نيوتن القوي لم يوضح الجاذبية بشكل كامل، فلم يتمكن من شرح كيف تعمل عبر الفراغ بشكل فوري غير مرئي، ولقد اعترف هو بذلك في كتابه العمدة حول الجاذبية في ١٦٨٧ والذي عنونه: «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية»، حيث كتب: «لم أتمكن من اكتشاف أسباب خصائص الجاذبية لتلك الظواهر الطبيعية، كما أنني لم أخرج بأي فرضيات».

فهم نسيج الزمكان

قوَّض ألبرت أينشتاين - الذي كان موظفًا في مكتب براءات الاختراع في مدينة برن، يبلغ من العمر ستة وعشرين عامًا - النظام النيوتني، ففي عام ١٩٠٥ قدم أينشتاين أربع ورقات بحثية من شأنها تغيير وجه الفيزياء.[٨] وفي إحداها تناول التأثير الكهروضوئي عندما تُطلق الإلكترونات عند سقوط الضوء على مادة ما، وأشار إلى أن الضوء يتصرف كجسيم، حاملًا الطاقة بكميات منفصلة تسمى «الكمات». وكان هذا البحث - وليس

نظريته النسبية الأكثر شهرة - هو ما أكسبه جائزة نوبل (شكل ٢). وقد أثبتت التجارب التي أجراها توماس يونج وآخرون بقطعية أن الضوء يظهر سلوكي الحيود والتداخل، ومن ثمَّ أُجبِرَ الفيزيائيون على قبول أن الضوء يشبه الموجة ويشبه الجسيم بطريقة ما.



شكل ٢: ألبرت أينشتاين في عام ١٩٢١، بعد خمس سنوات من نشر نظرية النسبية العامة، كانت نظريته تمثل خروجًا نهائيًّا عن جاذبية نيوتن، والتي تستند إلى الفضاء والزمان الخطيين المطلقين. أما في النسبية العامة يحدث للزمكان انحناء ناتج عن الكتلة والطاقة التي يحتويها.

«فرديناند شماتزر»

ثم قدَّم في ورقة بحثية قصيرة أخرى المعادلة الأكثر شهرة في الفيزياء: $E = mc^2$، وهي تشير إلى أن الكتلة والطاقة متكافئتان وقابلتان للتبادل، بما أن سرعة الضوء، c، عدد كبير جدًّا، يمكن تحويل كمية ضئيلة من الكتلة إلى كمية هائلة من الطاقة. فالكتلة تشبه صورة «متجمدة» من الطاقة، وهذا هو السبب في قوة الأسلحة النووية الهائلة. وبالعكس، تمتلك الطاقة كمية ضئيلة من الكتلة المكافئة. وطبقًا لهذه المعادلة، من المنطقي أن تتأثر الفوتونات بالجاذبية.

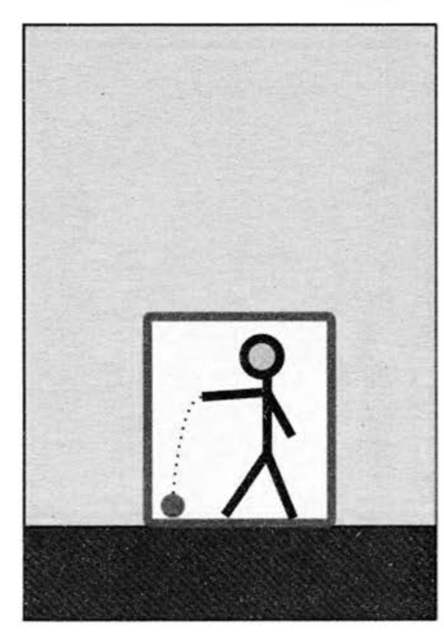
وفي ورقة بحثية ثالثة طرح نظرية النسبية الخاصة، وتأسست هذه النظرية على فكرة جاليليو بأن قوانين الطبيعة يجب أن تكون واحدة بالنسبة لجميع الراصدين الذين يتحركون بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضهم بعضًا، وأضاف فرضية ثانية مفادها أن سرعة الضوء لا تعتمد على حركة الراصد، وهي فرضية راديكالية، كما ستُثبِت تجربة فكرية بعد ذلك.[٩]

أضئ مصباحًا يدويًّا نحو شخص بعيد، واجعله يَقِسْ الفوتونات التي تصل بسرعة تبلغ ٣٠٠ ألف كم/ثانية، أي سرعة الضوء. لنفترض أنك تجري نحوه بنصف سرعة الضوء، سيواصل رؤية الفوتونات تصله بالسرعة نفسها، وليس بسرعة ٤٥٠ ألف كم/ثانية. لنفترض الآن أنك تجري مبتعدًا عنه بنصف سرعة الضوء، مرة أخرى سيرى الفوتونات تصل إليه بالسرعة نفسها، وليس بسرعة ١٥٠ ألف كم/ثانية. الضوء لا يتبع الحساب البسيط، سرعة الضوء ثابت كوني، وهو الأمر الذي ينطوي على دلالات عظيمة، فالسرعة تساوي المسافة مقسومة على الزمن، وإذا كانت السرعة ثابتة، يجب أن يكون المكان والزمان أكثر مرونة. عندما تتحرك الأجسام بسرعة كبيرة وتقترب من سرعة الضوء، فإنها تتقلَّص في اتجاه الحركة وتعمل ساعاتها بشكل أبطأ. تقول نظرية أينشتاين إن الضوء هو أسرع شيء في الوجود؛ لذلك توقع أيضًا أن الأجسام ستصبح أكثر ضخامة عندما تقترب من سرعة الضوء، مما يزيد من مقدار قصورها الذاتي، حتى لا تتمكن أبدًا من الوصول إلى تلك السرعة أو تجاوزها.

رغم روعة هذه الأعمال، كان أينشتاين فقط يُحمي عضلاته من أجل إنجازه الرئيسي: النظرية النسبية العامة. ومن خلال النسبية العامة وسَّع أينشتاين أفكاره من الحركة الثابتة إلى الحركة المتسارعة، وأضاف الجاذبية إليهما، وبدأ بفكرة أخرى من أفكار جاليليو. في عصر النهضة شاعت فكرة مفادها أن جميع الأجسام تسقط بالسرعة نفسها بغضِّ النظر عن كتلتها، وهذا يعني أن الكتلة القصورية (مقاومة جسم ما إلى التغير في حركته) هي كتلتها الثقالية نفسها (كيفية استجابة الجسم لقوة الجاذبية)، رأى جاليليو في هذا الأمر مصادفة ولغزًا، لكن أينشتاين رأى فيه مفتاحًا لمفهوم جديد للجاذبية.

تخيل أنك في مصعد مغلق عالق في الطابق الأرضي، ستشعر بوزنك الطبيعي، وأي شيء ستُسقِطه سيتسارع بعجلة قدرها ٩٫٨ م/ث٢. وهذه حالة جاذبية مألوفة، الآن تخيل أنك في صندوق مغلق في الفضاء (والذي يشبه داخل المصعد) يتم تسريعه بواسطة سفينة فضائية بسرعة ٩٫٨ م/ث٢. أحد هذين الموقفين تعمل فيه الجاذبية بينما لا تعمل في الموقف الآخر، لكن أينشتاين قد أدرك أنه ما من تجربة قادرة على التمييز بين الموقفين (شكل ٣). إليك موقفان آخران، في أحدهما أنت محاصر داخل المصعد في الفضاء السحيق، طافيًا داخل المصعد لأنك عديم الوزن. وفي الموقف الآخر، المصعد في مبنى شاهق وقد انقطع كابله لذا يسقط إلى قاع بئره. ولا توجد وسيلة

للتمييز بين هذين الموقفين، لا يمكن تمييز الجاذبية عن أي قوة أخرى. «مبدأ التكافؤ» هذا هو محور نظرية النسبية العامة لأينشتاين، رغم الكارثة التي ينطوي عليها الهبوط الحاد للمصعد، قال أينشتاين إن «أسعد أفكاره» كانت أن الشخص الذي يسقط لن يشعر بوزنه.





شكل ٣: في النسبية العامة لا يوجد فرق بين التسارع الناتج عن الجاذبية والتسارع الناتج عن أي قوة أخرى؛ لذا فإن شخصًا ما في صاروخ يتسارع في الفضاء السحيق بعجلة ٩٫٨ م/ث/ث (الشكل الأيسر)، سيشعر كما لو أنه يخضع لجاذبية الأرض ولن يلاحظ أي اختلاف في سلوك الأجسام الساقطة، مقارنة بما لو كان ثابتًا على سطح الأرض.

«ماركوس بوسيل»

كان مفهوم أينشتاين الجديد للجاذبية هندسيًّا؛ إذ تربط معادلات النسبية العامة كمية الكتلة والطاقة في المنطقة بانحناء المكان، فيتم استبدال المكان المنحني بفعل الأشياء التي يحتوي عليها (شكل ٤) بالمكان المسطَّح والخطي الذي افترضه نيوتن بما فيه من موجودات.[١٠] ويرتبط المكان والزمان معًا، ومن ثَمَّ تستطيع الجاذبية أن تغير من شكل الزمان وكذلك المكان. صاغ الفيزيائي جون ويلر - الذي سنلتقي به لاحقًا باعتباره الشخص الذي صكَّ مصطلح «الثقب الأسود» - هذا الأمر بإيجاز

قائلًا: «المادة تخبر المكان كيف ينحني، والمكان يخبر المادة كيف تتحرك». كما عبَّر الشاعر روبرت فروست عن ذلك المفهوم بأبيات شعرية، وهو الذي كانت له صلة بالكشف عن النسبية بشكل يناقض بعضه بعضًا، ففي قصيدة «أي حجم نشاء»، وجد أن فكرة الفضاء اللانهائي مرعبة، لكنه اطمأن إلى فكرة الانحناء الذي يصف الثقب الأسود:

ظنَّ أنه إذا كان بإمكانه جعل كل فضاءه منحنيًا،

ملتفًا حول نفسه وصديقًا لذاته،

حينها لن يثير فيه علمه الغضب.

لقد كان متحمسًا للغاية، مهتمًا أكثر من اللازم.

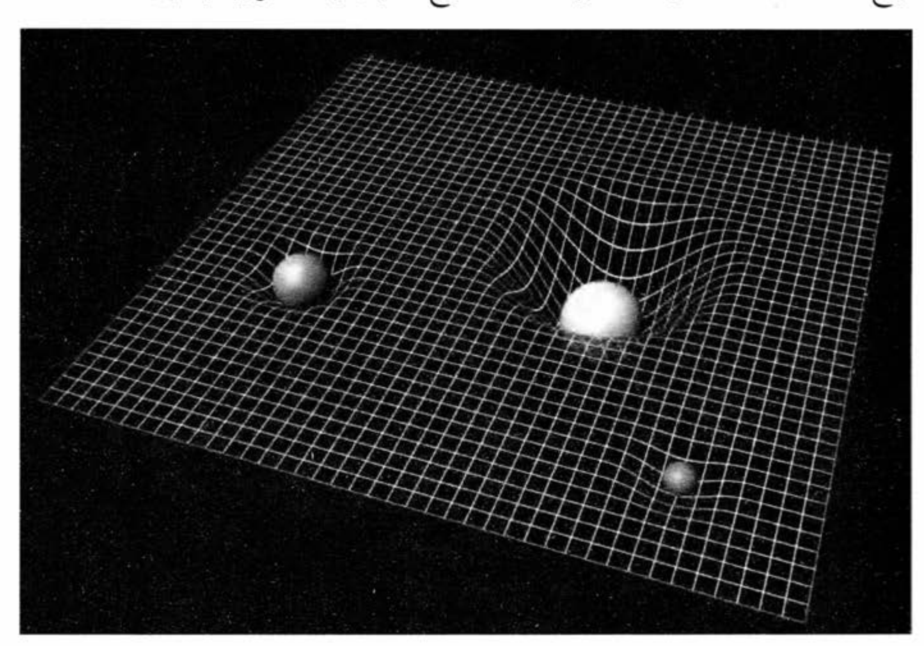
حتى أنه كان يتحسس صدره ليطمئن لوجود ثروته.

ويحتضن نفسه لأجل الكون بأسره.

ثمَّة ثلاثة آثار للنسبية العامة ترتبط بحالات المادة الكثيفة تحديدًا، والتي تجسِّدها الثقوب السوداء، الأول هو انحراف الضوء؛ لأنه يتبع تموُّج الزمكان بسبب تركيز الكتلة. كان هذا الاختبار التقليدي الأول للنسبية العامة، والذي أُجرِيَ في عام ١٩١٩، بعد ثلاث سنوات من نشر أينشتاين للنظرية، حيث قاس فريق بقيادة الفيزيائي الفلكي الإنجليزي العظيم آرثر إدنجتون، الانحناءَ الطفيف لضوء النجوم عندما مرَّ بالقرب من حافة الشمس. لم يكن قياسًا دقيقًا للغاية، ولكن تأكيد النسبية حوَّل أينشتاين إلى أحد المشاهير، ورفعه لدرجات عُليا في الأوساط العلمية. وفي عام ١٩٩٥ توافق قياس أكثر دقة مع توقعات أينشتاين بنسبة بلغت ٠,٠١ ٪.[١٢]

أما التأثير الثاني فيتمثل في فقدان الطاقة الذي يحدث عندما يترك الضوء جسمًا ضخمًا، وهو الأمر الذي يُطلَق عليه اسم «الانزياح الثقالي نحو الأحمر». لفهم الأمر تخيَّل الفوتونات تكافح ضد الجاذبية، قِيسَ هذا التأثير لأول مرة تجريبيًا في عام ١٩٦٠. ومن التأثيرات وثيقة الصلة بهذا هو تمدُّد الزمن؛ أي التنبؤ بتباطؤ الساعات عندما تتعاظم الجاذبية. اكتُشِفَ تمدُّد الزمن لأول مرة عام ١٩٧١، عندما وُضِعَت ساعة ذريَّة في طائرة تطير على ارتفاع شاهق، فجرت عقاربها بشكل أسرع قليلًا من ساعة ذريَّة مطابقة لها موجودة على الأرض. وفي عام ٢٠١٠ كُشِفَ عن تمدُّد الزمن عبر فصل رأسي لمتر واحد فقط، وهو الأمر الذي يتطلب ساعة ذات دقة مذهلة تبلغ ثانية واحدة

على ٤ مليارات سنة.[١٣] وتتفق قياسات تمدُّد الزمن أيضًا مع توقعات النظرية بدقة تبلغ ٠,٠١٪. لقد اجتازت النسبية العامة جميع اختباراتها التجريبية بامتياز.



شكل ٤: في نظرية النسبية لأينشتاين ينحني المكان جرَّاء الكتلة التي يحتوي عليها، والذي يُصوَّر هنا في تشبيه ثنائي الأبعاد، حيث يزداد الانحناء مع زيادة الكتلة، ويمثل الثقب الأسود وضعًا «يقتطع» فيه الزمكان من بقية الكون، وفي حالة النجوم والكواكب الطبيعية، يكون انحناء المكان غير ملحوظ.

«وكالة الفضاء الأوروبية/كريستوف كارو»

ربما تبدو النسبية العامة مقصورة على أشياء معينة وبعيدة عن الحياة اليومية، ولكن نظام تحديد المواقع العالمي الـ (GPS) كان سيفشل تمامًا لو لم يُضمَّن تمدُّد الزمن في حساباته؛ إذ يعتمد تحديد موقع هاتف على الأرض في نطاق متر على قياسات دقيقة للغاية للأقمار الصناعية التي تدور في فلكها، والتي تحتوي على ساعات ذريَّة.[١٤] تحدث عمليات حساب النسبية بواسطة الشرائح الإلكترونية في هاتفك الخلوي، ودون هذه التصحيحات كان نظام تحديد المواقع العالمي سيحدد الموقع بعيدًا عن الموقع الصحيح بمسافة عشرة كيلومترات بعد يوم واحد، إن تأثيرات النسبية نجدها بسيطة في النظام الشمسي وحيثما تكون الجاذبية ضعيفة، لكننا سنرى أنها كبيرة للغاية عندما تنهار النجوم وتصبح الجاذبية قوية.

المتفردة وانعدام الحياة

إن النسبية العامة نظرية بسيطة وجميلة، وقد قال أينشتاين عنها: «إن من يفهم هذه النظرية بشكل كامل نادرًا ما يستطيع أن يهرب من سحرها».[١٥] لكن قلة من الناس فقط لديهم القدرة الرياضية على أن يتعاملوا مع النسبية، ففي شكلها الأكثر اختصارًا، تربط معادلة واحدة كثافة الطاقة/الكتلة بانحناء الزمكان. وهو أمر بصعوبة قراءة مسرحية لشكسبير في خمس دقائق، أما تفصيلها فهو عبارة عن منظومة من عشر معادلات تفاضلية جزئية، مرتبطة لا خطيَّة، مفصَّلة إهليجية. وتستند الحسابات الرياضية الأساسية لهذه النظرية على متعددات الشعب، والأشكال المعقدة متعددة الأبعاد، التي عند مقارنتها بالفضاء الإقليدي تكون كمن يقارن بين تنين أوريجامي وورقة مسطحة.[١٦]

عمل أينشتاين على تقديم حلول تقريبية لنظريته حتى يتمكن آرثر إدنجتون من إعداد حملته لقياس الانحراف الثقالي لضوء النجوم خلال كسوف الشمس، ورغم أنه شكَّ في إمكانية حل المعادلات بصورة مضبوطة، فإن النسبية العامة جذبت انتباه أفضل العقول في الفيزياء على الفور، كان أحد هؤلاء الذين حققوا تقدمًا ملحوظًا كارل شفارتسشيلد، الذي وُلِدَ في فرانكفورت وسرعان ما أظهر نضجًا مبكرًا، حيث نشر بحثين حول مدارات نظم النجوم المزدوجة عندما كان في السادسة عشرة من عمره، وترقى سريعًا ليصبح أستاذًا ومديرًا لمرصد جامعة جوتنجن، ورغم أنه كان قد تخطى الأربعين عامًا عندما اندلعت



تشعر الأجسام هنا بجاذبية الثقب الأسود، ولكن يستطيع الضوء الإفلات منها.

شكل ٥: الثقوب السوداء أجسام بسيطة، تتميز بالكتلة والدوران، ويمثل أفق الحدث حاجز معلومات يفصل بين مناطق الزمكان التي نراها وتلك التي لا نستطيع رؤيتها. أما المتفردة في مركز الثقب الأسود فهي نقطة ذات كثافة كتلة لا نهائية.

«مونيكا تيرنر/العلوم في المدرسة/ منتدى *EIROforum*»

الحرب العالمية الأولى، فقد ألهمته الوطنية أن ينخرط في الجيش الألماني، فخدم على الجبهتين الغربية والشرقية وترقى إلى رُتبة ملازم في المدفعية.

تراسل شفارتسشيلد مع أينشتاين في أواخر عام ١٩١٥ بينما كان يعاني من برد شديد على الجبهة الروسية. وكتب شفارتسشيلد: «لقد عطفت عليَّ الحرب بما فيه الكفاية، فعلى الرغم من نيرانها الكثيفة، فقد سمحت لي بالابتعاد عن كل شيء والقيام بهذه الرحلة في أرض أفكارك».[١٧] أعجب أينشتاين بحل شفارتسشيلد الدقيق لمعادلاته وقدَّمه إلى الأكاديمية الألمانية للعلوم، لكن شفارتسشيلد أُصيبَ بمرض جلدي نادر ومؤلم يسمى «الفقاع»، ممَّا منعه من متابعة تطوير أفكاره. فقد قدَّم ورقة بحثية للنشر في فبراير ١٩١٦، ثم أعيد إلى الوطن من الجبهة الروسية في مارس، وتوفي في مايو في ذلك العام.

ما الحل الذي قدمه شفارتسشيلد؟ تعتمد سرعة الإفلات من سطح جسم على كتلته ونصف قطره، أخذ ميشيل ولابلاس يتفكران في احتمالية حدوث انحباس الضوء بسبب نجم كبير ضخم بكثافة الشمس نفسها، ثم أدرك شفارتسشيلد أن سرعة الإفلات يمكن أن تبلغ أيضًا سرعة الضوء ذاتها إذا ما انضغط نجم مثل الشمس فصار ذا كثافة عالية. كان حلُّه يتضمن ملمحين لافتين؛ أولهما أن الجاذبية تجعل الجسم ينضغط إلى حالة من كثافة الكتلة اللانهائية تسمى «المتفردة»، أما الملمح الثاني فيتمثل في توقع حد الجاذبية القادر على أن يحبس أيًّا ما في داخله للأبد. ذلك هو «أفق الحدث»، إن المتفردة وأفق الحدث هما المكونان الأساسيان للثقب الأسود (شكل ٥).

سيد الانهيارات والانفجارات

لم يكن أينشتاين سعيدًا؛ فقد كان هو وإدنجتون مقتنعين بأن المتفردة علامة على قصور في الفهم الفيزيائي، فليس من المنطقي أن يكون للجسم المادي حجم صفري وكثافة كتلة لا نهائية، لقد فتحت نظرية أينشتاين فتحًا علميًّا هائلًا، واعتقد علماء فيزياء آخرون أن حل شفارتسشيلد كان حقيقة محدودة النطاق. فبالنسبة إلى نجم مثل الشمس، كان نصف القطر الذي حدده شفارتسشيلد - أي حجم أفق الحدث - يبلغ ثلاثة كيلومترات، كيف يمكن لنجم يبلغ قطره ١,٤ مليون كيلومتر - أي ضعف حجم الأرض بأكثر من مائة مرة - أن ينضغط إلى حجم قرية؟

لكن عبقريًا فيزيائيًّا آخرَ كان مقتنعًا أن ذلك ممكن، وُلِدَ روبرت أوبنهايمر في نيويورك ودرس الفيزياء في جامعة هارفارد، وبعد حصوله على درجة الدكتوراه، سافر إلى جميع أنحاء أوروبا وانغمس حتى أذنيه في مجال ميكانيكا الكم الناشئ، كان سخيًّا في إسهاماته العلمية، فمن بين إنجازات أخرى كان أول من طبّق نظرية الكم على الجزيئات، وتنبأ بالمادة المضادة، وكان رائدًا في نظرية الأشعة الكونية. وخلال رحلته العلمية أنشأ أفضل برنامج فيزياء نظرية في العالم في جامعة كاليفورنيا ببيركلي. كان أوبنهايمر رجلًا مثقفًا له اهتمام شديد بالفن والموسيقى، وقد درس اللغة السنسكريتية وقرأ في الفلسفة باللغة اليونانية القديمة، وكان ذا ضمير اجتماعي قوي وميول يسارية.[١٨]

طوّر أوبنهايمر الأدوات اللازمة لفهم المادة النووية وأدرك أن الفيزياء الفلكية قدمت بعض الأمثلة المدهشة في العالم الحقيقي، فمع تطور النجم، يحافظ على توازن دقيق بين الجاذبية، والتي دائمًا ما تمثل قوة سحب إلى الداخل، والضغط الناتج عن تفاعلات الاندماج، والذي يمثل قوة تدفع للخارج. وطالما استمرت التفاعلات النووية تظل الشمس مستقرة ثابتة الحجم. لكن عندما ينفد الوقود الهيدروجيني من الشمس، تنضغط إلى حالة كثيفة من المادة مدعومة بقوة ميكانيكية كميَّة تُسمى ضغط التحلل، والذي يُسمى القزم الأبيض. وقد توصل عالم الفيزياء الفلكية الهندي سابرامانين تشاندراسخار إلى أن جاذبية النجم الأكثر ضخامة من الشمس يمكن أن تتغلب على قوة ضغط التحلل وتنضغط إلى كثافة نواة ذريَّة ضخمة، وهو ما يُسمى النجم النيوتروني. وفي عام ١٩٣٩ كتب أوبنهايمر وأحد طلابه في الدراسات العليا ورقة بحثية بعنوان: «حول الانكماش الجاذبي المستمر»[١٩] حيث أوضحا بحسابات معقدة أن النجم الأكثر ضخامة سينضغط حتى يصل إلى كثافة تتخطى أي شكل معروف من المادة، وفي نهاية حياة النجم الفائق الضخامة، سيتشكل حتمًا ثقب أسود.

في عام ١٩٤٢ عُيِّنَ أوبنهايمر قائدًا للجهود الأمريكية الرامية لتصنيع قنبلة ذريَّة، فقام بتجميع فريق أحلام مؤلَّفًا من فيزيائيين موهوبين، للعمل في موقع سِريّ في لوس ألاموس بشمال نيو مكسيكو، من أجل بذل جهد مكثف يهدف إلى الوصول إلى أفضلية حاسمة في الحرب ضد اليابان.[٢٠] وكان أوبنهايمر متفانيًا في عمله، ولكن بانت عليه علامات صراع نفسي يموج بداخله، فبعد أن شهد انفجار اختبار ترينيتي عام ١٩٤٥، قال لأخيه: «لقد نجح الأمر». لكن ذُكِرَ عنه فيما بعد أنه استشهدَ بعبارات شهيرة من البهاجافاد جيتا الكتاب المقدَّس للهنود المكتوب بالسنسكريتية قائلًا عن نفسه: «لقد أصبحت الموت، مدمِّر العوالم».[٢١] وبعد الحرب أدت آراء أوبنهايمر السياسية إلى

تدميره؛ فقد تعرَّض لملاحقة مهينة من قِبَل مطاردي المناهضين للشيوعية، وجُرِّد من تصريحه الأمني، ولم يستطع تبرئة سمعته بشكل كامل مرة أخرى، لكنه ترك إرثًا علميًّا هائلًا كان من أهم علاماته نقل الثقوب السوداء من خانة التكهنات إلى فئة الظواهر العلمية المقبولة عقليًّا.

صياغة مصطلح مثالي للشيء الغامض

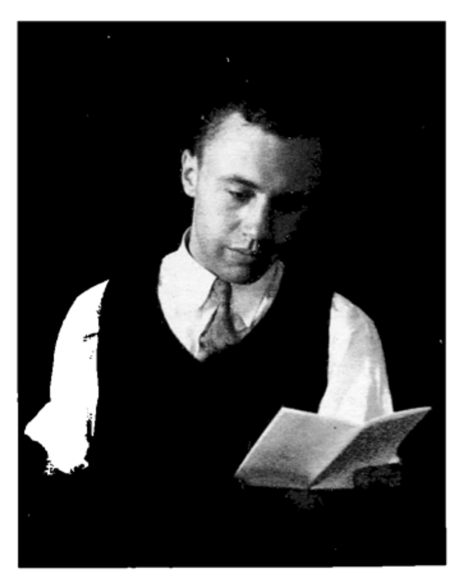
لا يتفق الفيزيائيون دائمًا، فغالبًا ما يتنافس العِظام من العلماء بضراوة خلال سعيِهم المحموم لفهم قوانين الطبيعة، وقد شهدتُ بنفسي منافسات شرسة في مجال عملي، وصُعقت لما سمعت من كلمات قاسية يوجهها العلماء أحيانًا لبعضهم بعضًا، عادةً ما يتم تأكيد أفضل الأفكار وتنحية الضغائن جانبًا، ولكن في بعض الأحيان يكون للصراع جذور في شخصيتي المتصارعين، كما كانت الحال مع روبرت أوبنهايمر وجون ويلر، الرجل الذي صاغ مصطلح «الثقب الأسود» (شكل ٦).

تتلمذ ويلر على يد الفيزيائي الدنماركي العظيم نيلز بور، الذي غرس فيه عادة عدم الاكتفاء بالخوض في المعادلات وحسب، ولكن أيضًا طرح أسئلة عميقة حول طبيعة الواقع الذي تكشفه الفيزياء. فكر في البداية أن ينجز أطروحته للدكتوراه في بيركلي تحت إشراف أوبنهايمر، لكنه عَدَل بعدها عن ذلك القرار؛ لأن أوبنهايمر كان يزيد عنه في العمر بسبعة أعوام فقط. قضى ويلر معظم حياته المهنية كأستاذ في جامعة برنستون، حيث أشرف على العديد من أفضل علماء الفيزياء الذين ظهروا في النصف الثاني من القرن العشرين، ويعود له الكثير من الفضل في جعل دراسة الجاذبية موضوعًا رئيسيًّا وأساسيًّا في البحث العلمي. ففي عام ١٩٧٣، قبيل تقاعده، ألَّف ويلر واثنين من طلابه السابقين الكتاب العلامة «الجاذبية»، والذي لا يزال طلاب الدراسات العليا في الفيزياء يدرسونه حتى اليوم.[٢٢]

في اليوم نفسه من عام ١٩٣٩، الذي نُشر فيه بحث أوبنهايمر حول انضغاط النجوم، نشر ويلر وبور تفسيرهما للانشطار النووي، بينما في أوروبا كان هتلر يجتاح بولندا في الوقت نفسه، وعلى غرار أينشتاين وإدنجتون من قبله، رفض ويلر فكرة المتفردة؛ فقد وجدها هو أيضًا خرقًا لقواعد الفيزياء. وفي مؤتمر عُقِدَ عام ١٩٥٨، ألقى ويلر محاضرة رفض فيها فكرة أوبنهايمر قائلًا: «إنها لا تقدم إجابة مقبولة»، وتبع ذلك جدال محتدم. كان أوبنهايمر عادة حادًّا ضيق الصدر غير مكترث بمن حوله، بينما كان

ويلر جادًا ومتحمسًا ومليئًا بفضول لمعرفة المزيد عن كل شخص يقابله. قال ويلر ذات مرة عن أوبنهايمر: «لم أفهمه أبدًا، كنت دائمًا أشعر أن عليَّ أن أضع حاجزًا بيني وبينه». أعاد ويلر دراسة فكرة أوبنهايمر بعد أن أظهرت رموز الكومبيوتر المستخدمة في صنع نماذج للقنابل معقولية الفكرة، وفي مؤتمر عام ١٩٦٢، امتدح عمل أوبنهايمر، ولكن أوبنهايمر لم يسمع كلمات الدعم من ويلر، حيث كان قد فضَّل البقاء خارج القاعة ليتحدث إلى زميل له.[٢٣]

كان عداؤهما يغذيه اختلاف كبير في الرأي وقع بينهما خلال الحرب، كان أوبنهايمر هو المهندس الرئيسي لبرنامج القنابل الذريَّة الذي ساعد في إنهاء الحرب، لكنه بعد ذلك كرَّس كل جهوده لمنع انتشار الأسلحة النووية في الوقت ذاته الذي قاد فيه ويلر وإدوارد تيلر جهود صناعة القنبلة الهيدروجينية الأكثر قوة، والتي لقباها بالـ «سوبر».[٢٤] لكن أوبنهايمر وقف منهما موقفَ المُعارض، إذ كان يقول: «دعوا تيلر وويلر يمضيا قدمًا. دعوهما يسقطا على وجهيهما».[٢٥] لكن ذلك لم يحدث، وسرعان ما انحنى أوبنهايمر أمام براعتهما التقنية، التي جعلت تصنيع القنبلة الهيدروجينية ممكنًا. فمن جانبه كان ويلر قد تحوَّل إلى صقر متعصِّب للحرب بعد مقتل أخيه عام ١٩٤٤ وهو يقاتل في إيطاليا، بل إنه أبدى أساه الشديد لأن القنبلة لم تُطوَّر في الوقت المناسب لتغيير مسار الحرب في أوروبا.



شكل ٦: جون أرشيبالد ويلر، أحد الفيزيائيين البارزين في النصف الثاني من القرن العشرين، ومؤلف كتاب «الجاذبية» الشهير. وهو الذي صاغ مصطلح «الثقب الأسود».
«مكتب السجلات العامة، مركز دولف بريسكو للتاريخ الأمريكي، جامعة تكساس بأوستن»

في حديث عام ١٩٦٧ قال ويلر إنه بعد أن يكرر المرء اسم «أجسام كاملة الانضغاط الجذبوي» كثيرًا، سيبدأ في البحث عن اسم أفضل، حينها صاح أحد أفراد الجمهور (الذي لم تُعرَف هويته مطلقًا): «ماذا عن مسمى «الثقب الأسود»؟»، بدأ ويلر بعدها في استخدام هذا المصطلح لمعرفة ما إذا كان سيلقى قبولًا، وقد حدث. وكما كان مصطلح «الانفجار العظيم» الذي صاغه أيضًا شخص لا علاقة له بالموضوع، فإن مصطلح «الثقب الأسود» مصطلح عاميٌّ لكنه دقيق.[٢٦] وفي سيرته الذاتية كتب ويلر يقول: «إن الثقب الأسود يعلمنا أنه يمكن للفضاء أن يتجعد كقطعة من الورق حتى يصير نقطة متناهية الصغر، ويمكن أن يُطفأ فيها الزمن كشمعة نفث في لهبها، وتتخلى فيه قوانين الفيزياء التي نعتبرها مقدسة وغير قابلة للتغيير، عن قداستها تلك».

عبقري يكافح الجاذبية والمرض

كان ستيفن هوكينج عقلًا متألقًا آخرَ من الذين انخرطوا في تحدي الثقوب السوداء، وقصته مألوفة لنا لدرجة أننا ننسى كم هي مدهشة، كان هوكينج طالبًا خجولًا وعادي المستوى في المدرسة، لكنه حصل على مرتبة الشرف من الدرجة الأولى عن طريق المذاكرة لمدة لا تزيد عن ساعة في اليوم لمدة ثلاث سنوات. ولما أُصيب بمرض التصلُّب الجانبي الضموري - وهو مرض عصبي حركي تنكُّسي - في سن الحادية والعشرين، قيل له إنه لم يتبق في عمره سوى عامين، ومع ذلك فقد اُختِيرَ لعضوية الجمعية الملكيَّة في سن الثانية والثلاثين، وكأستاذ كرسي لوكاس للرياضيات في جامعة كامبريدج – وهو المنصب الذي شغله إسحاق نيوتن في السابق - في سن الخامسة والثلاثين. وخلال عقد الثمانينيات من القرن الماضي كاد يلقى حتفه بسبب الالتهاب الرئوي الذي أفقده القدرة على الكلام، ومنحه صوته الآلي الشهير الذي صار علامة مميزة له. كان نشره لكتابه «تاريخ موجز للزمان» والذي بيعَ منه أكثر من ١٠ ملايين نسخة، قد حوَّله إلى واحد من مشاهير العالم.[٢٧] وبوفاته في مارس ٢٠١٨، كان قد تجاوز موعد الوفاة الذي حدده له الأطباء بأكثر من نصف قرن (شكل ٧).

وصف المقربون من هوكينج شخصيته بأنها شخصية حادة الطباع،[٢٨] لكنه في الفيزياء كان يعتبر العقل الأكثر ذكاءً وابتكارًا منذ أينشتاين.[٢٩] في أطروحته للدكتوراه ركَّز هوكينج على موضوع فضَّل معظم الفيزيائيين تجنبه؛ ألا وهو المتفردات. فكما

رأينا أدت النتائج التي تنطوي عليها فكرة وجود المتفردة في مركز الثقب الأسود، إلى جعل أينشتاين نفسه يتشكَّك في نظريته الخاصة. والمتفردة في الرياضيات هي الحالة التي تكون فيها الدالة لها قيمة لا نهائية. وهو أمر يحدث كثيرًا، وليس بالأمر الجسيم؛ إذ تمتلك الرياضيات العديد من الطرق للتلاعب والتعامل مع اللانهائية. لكن في الفيزياء تمثل اللانهائية مشكلة كبيرة. على سبيل المثال، قد تتنبأ نظرية تصف السوائل بأنه في ظل ظروف معينة تصبح كثافة السائل لا نهائية. من الواضح أن ذلك مفهوم لا يَمَتُّ للفيزياء بصلة، ويشير إلى خطأ في النظرية.



شكل ٧: ستيفن هوكينج وهو يتسيَّد الجاذبية مؤقتًا خلال رحلة على متن طائرة بوينج ٧٢٧ مُعدَّلة في عام ٢٠٠٧. كان رائد الأعمال في مجال الفضاء بيتر ديامانديس قد نظَّم هذه الرحلة بالتعاون مع وكالة ناسا. وكان هوكينج يأمل في قضاء رحلة أطول بلا جاذبية مع فيرجن جالاكتيك.

«جيم كامبل/أيورو نيوز نتورك»

لكن هوكينج لم يكن على يقين من أن تلك المتفردات تشير إلى وجود مشكلة في النسبية العامة، فأقام تعاونًا مع روجر بنروز، عالم الرياضيات في جامعة أكسفورد، والذي أحدث ثورة في الأدوات المستخدمة لدراسة خصائص الزمكان.

في النسبية العامة يمكن أن يتصرف الزمكان على نحو غريب، وسلوكياته الغريبة تلك جزء من النظرية وليست إشارات على وجود خلل فادح يعتريها. يمكن أن يتضمن الزمكان طيات وتمزُّقات وحوافًا وثقوبًا وثنيات، وأن يكون مضاعف الترابط ومعقدًا طوبولوجيًّا.[30] إن «مشهد» النسبية العامة يختلف اختلافًا شديدًا عن جاذبية نيوتن، التي تعتمد على فضاء ثلاثي الأبعاد بسيط وخَطِيٍّ في كل مكان، حيث تتضمَّن النسبية العامة إمكانية وجود المتفردات.

هناك نوعان فقط من المتفردات الزمكانية في النسبية العامة، قد تحدث المتفردة عن طريق انضغاط المادة للوصول إلى كثافة كتلة لا نهائية (كما في الثقب الأسود)، أو قد تنشأ عندما تأتي الأشعة الضوئية من مكان ذي انحناء لا نهائي وكثافة طاقة لا نهائية (كما هو الحال في الانفجار العظيم). بالنسبة للنوع الأول فهو أشبه بورقة مسطَّحة بها ثقب فيها أو حافة، (النوع الثاني ليس له شبيه واضح). وأي جسيم ينتقل على طول الورقة يختفي ببساطة عندما يقابل المتفردة. هدف هوكينج وبنروز إيجاد صيغة عامة، فتخلصا من الكثير من الافتراضات قدر الإمكان وأثبتا سلسلة من نظريات متعلقة بالمتفردة، وهي نظريات لقيت حفاوة من مستقبِليها وكانت تهدف لإظهار أن المتفردات أمر حتمي في النسبية العامة. بعبارة أخرى نقول إنها تمثل سِمَة للنظرية وليست عيبًا يعتريها. فيجب أن يكون لكل ثقب أسود متفردة كتلة، ولا بد لكل كون آخذ في الاتساع (مثل كوننا) أن يكون قد بدأ بمتفردة طاقة. استخدم هوكينج ذلك المثال المستقَى من علم الكونيات في أطروحته، وهو ما جعله يرتقي على الفور إلى مصاف النجوم في عالم الفيزياء النظرية النادر.[31]

بعد ذلك وجَّه هوكينج انتباهه إلى الثقوب السوداء، واقترح مع زميلين له فكرة مفادها أنه على غرار جميع الأجسام الأخرى في الكون، تخضع الثقوب السوداء لقوانين الديناميكا الحرارية. في هذا الوقت، في منتصف ستينيات القرن العشرين، تم إيجاد حل كامل في النسبية العامة لثقب أسود دوَّار، ما أضيف إلى حل شفارتسشيلد السابق لثقب أسود ثابت. في الرياضيات أو الفيزياء، يتمثل الحل في مجموعة قيم للمتغيرات التي تتوافق مع جميع المعادلات، ومما يدل على مدى صعوبة إيجاد حلول دقيقة في النسبية أنه لم يتم العثور سوى على حلين فقط خلال ١٠٠ عام كاملة!

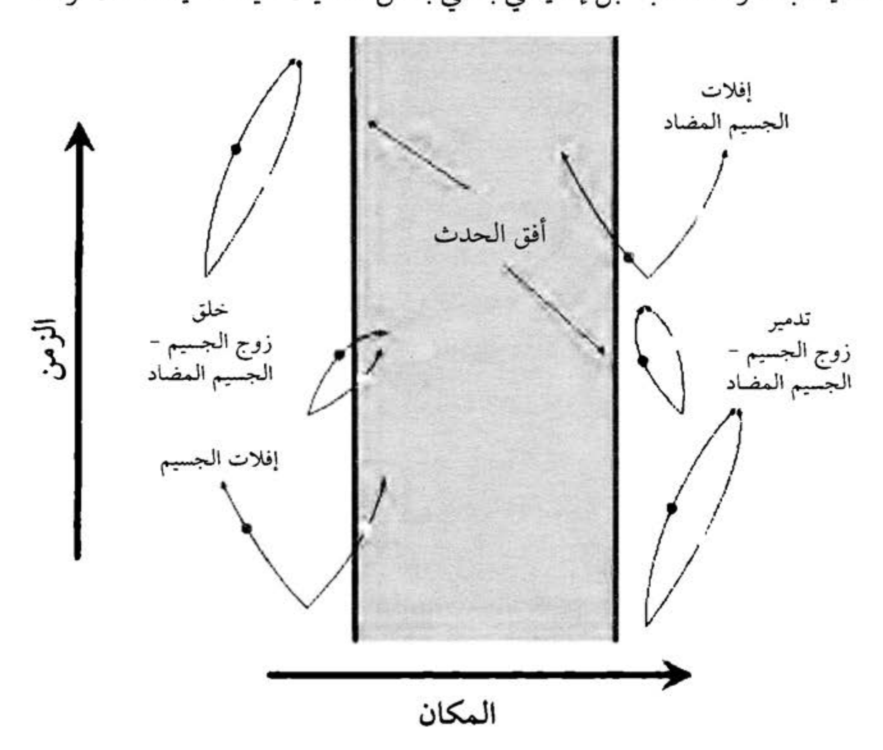
أحد «قوانين» هوكينج للثقب الأسود ينصُّ على أن مساحة سطح الثقوب السوداء في ازدياد دائم، عندما تسقط المادة في الثقب الأسود يزداد حجم منطقة أفق الحدث،

وعندما يندمج ثقبان أسودان تكون مساحة أفق الحدث الناتج أكبر من مجموع أفقي الحدث الفرديين، أدى هذا إلى نقاش جديد، مع استنتاج مذهل.

في عام ١٩٦٧ طرح جون ويلر فرضية ترى الثقوب السوداء أجسامًا بسيطة للغاية، لا يمكن وصفها إلا من خلال كتلتها وزخمها الزاوي.[٣٢] ولموهبته في ابتكار أسماء جذابة فقد أطلق على هذه الفرضية مُسمى نظرية «اللاشعر»، مستخدمًا الشعر كاستعارة للتدليل على التفاصيل التي تميز معظم الأجسام المادية. حاول جيكوب بيكنشتاين، وهو أحد طلاب ويلر في الدراسات العليا، دمج نظرية ويلر مع مفهوم هوكينج لمساحة سطح الثقب الأسود، أشار بيكنشتاين إلى أن مساحة الثقب الأسود مؤشر لإنتروبيته، تعني الإنتروبيا لدى العامة الفوضى، أما في الفيزياء فهي مؤشر لعدد الطرق التي يمكن بها إعادة ترتيب الذرات أو الجزيئات في جسم ما دون إحداث تغيير في خصائصه الكُليَّة. إن نظرية «اللاشعر» تشير ضمنًا إلى أن الثقوب السوداء ليس لها إنتروبيا، ولكن بيكنشتاين أشار إلى أنه لا يوجد شيء مرصود في الطبيعة مُحصَّن ضد القانون الثاني للديناميكا الحرارية – والذي ينصُّ على أن الإنتروبيا تتزايد دائمًا - ويجب ألَّا تكون الثقوب السوداء استثناءً من ذلك.[٣٣] وبما أن الديناميكا الحرارية هي من الفيزياء بمنزلة حجر الأساس، فقد قَبِلَ هوكينج فرضية بيكنشتاين، لكن ذلك وضعه أمام معضلة؛ فإذا كان للثقب الأسود إنتروبيا، فلا بد أن يكون له حينها درجة حرارة، وإذا كان له درجة حرارة، فلا بد أنه يُشعُّ طاقة. ولكن إذا لم يكن هناك شيء يفلت من الثقب الأسود، فكيف له أن يُشعَّ طاقة؟

أذهل حل هوكينج لتلك المعضلة أعضاء مجتمع الفيزياء النظرية، لقد قال إن الثقوب السوداء تتبخر، وتتلخص هذه الفرضية فيما يلي: تنصُّ الفيزياء الكلاسيكية على خواء فراغ الفضاء، ولكن في نظرية الكم لا تفتأ «الجسيمات الافتراضية» تُخلَق وتُدمَّر؛ فهي تتواجد للحظات خاطفة من الزمن، تماشيًا مع مبدأ عدم اليقين الذي وضعه هايزنبرج. عادةً ما تختفي هذه الأزواج من الجسيمات والجسيمات المضادة أو أزواج الفوتونات دون أي تأثير. ولكن بالقرب من أفق الحدث للثقب الأسود، يمكن للجاذبية الشديدة أن تفصل الأزواج الافتراضية، فيسقط أحدها ويطير الآخر ويصبح حقيقيًّا (شكل ٨)، وهذه هي الطريقة التي يُشعُّ بها الثقب الأسود الطاقة، والطاقة اللازمة لصنع الجسيمات الحقيقية تأتي من مجال جاذبية الثقب الأسود وهو ما يؤدي إلى انخفاض في الكتلة، وهذه الفرضية قد جعلت هوكينج يعارض عبارة أينشتاين الشهيرة

المتعلقة بميكانيكا الكم، والتي تقول: «إن الله لا يلعب النرد مع الكون» فيقول هو: «إن الله لا يلعب النرد فحسب، بل إنه يُلقي به في بعض الأحيان حيث لا يمكننا أن نراه».[٣٤]



شكل ٨: الثقوب السوداء ليست سوداء بالكامل. تواصل الأزواج المكونة من الجسيمات والجسيمات المضادة افتراضية النشوء وتدمَّر بعد فترة قصيرة من الزمن. وفقًا لنظرية ستيفن هوكينج، عندما تحدث هذه العملية بالقرب من أفق حدث ثقب أسود، يمكن لأحد أفراد الزوج الإفلات بينما يلتقط الثقب الأسود الجسيم الآخر، وتأثير ذلك هو أن الثقوب السوداء تُشعُّ الطاقة ومن ثمَّ تتبخر ببطء.

«كريس إمبي»

كانت نظرية هوكينج للإشعاع مثيرة للجدل، ولكنها كانت فكرة عبقرية على نحو لا يمكن إنكاره، حتى إنه لم يمضِ وقت طويل بعدها حتى انتُخب هوكينج زميلًا للجمعية الملكيَّة، ولسوء الحظ فإن تأثير إشعاع هوكينج ضئيل للغاية بالنسبة إلى بقايا نجم في كتلة الشمس؛ إذ يبلغ واحدًا على عشرة ملايين من وحدة كلفن، وهو قدر ضئيل للغاية على المقياس الفلكي. وكذلك فإن معدل التبخر بطيء على نحو مثير

للدهشة؛ إذ سيستغرق اختفاء ثقب أسود بكتلة تساوي كتلة الشمس تمامًا $١٠^{٦٦}$ سنة. ولكن ذروة هذه العملية ليست اعتيادية؛ حيث تزداد درجة الحرارة ومعدل التبخر بتناقص الكتلة، ومن ثمَّ تختفي الثقوب السوداء بانفجار ذي إشعاع متصاعد.

وقتها كانت الثقوب السوداء لا تنفك تزداد غرابة، وكان الفيزيائيون يستكشفون تداعياتها حتى وهم يشكون في وجودها. وفي عام ١٩٣٥ قدم ألبرت أينشتاين وناثان روزن فرضية تقترح وجود «جسور» تربط بين نقطتين مختلفتين في الزمكان.[٣٥] وعند أيٍّ من طرفي هذا الجسر يوجد الثقب الأسود، وقد أطلق جون ويلر على هذا الجسر اسم الثقب الدودي. كما تسمح النسبية العامة بوجود مناطق في الزمكان لا يمكن دخولها من الخارج، لكن مع ذلك تسمح للضوء والمادة بالهروب منها، وتُعرف هذه باسم «الثقوب البيضاء». وربما يكون لمنطقة الثقب الأسود في المستقبل منطقة ثقب أبيض في الماضي. لم تُرصد الثقوب الدودية والثقوب البيضاء، لكن كما قال ستيفن واينبرج ذات مرة: «هذه هي طريقة الفيزياء في الغالب، خطؤنا ليس أننا نأخذ نظرياتنا على محمل الجد، ولكن أننا لا نأخذها بجدية كافية».[٣٦]

لقد صارت الثقوب السوداء في الثقافة الشعبية صورة مجازية تُعبِّر عن الموت والدمار، لكنها أيضًا تحمل صورة الأمل في التغيُّر والحياة الأبدية، حيث إن الزمن يتجمد في أفق الحدث ولا يعرف أحد ما يوجد في داخله. وكما كتب الروائي مارتن أميس يقول: «فهم هوكينج الثقوب السوداء لأنه كان يستطيع التحديق فيها. الثقوب السوداء تعني النسيان. تعني الموت. وقد كان هوكينج يحدق في الموت طوال حياته».[٣٧]

الرهان على الثقوب السوداء

كان ستيفن هوكينج هو خير من يدخل المرء معه في رهان؛ فقد كان نادرًا ما يربح.[٣٨] وكان أول رهاناته فرضية الرقابة الكونية. ففي عام ١٩٦٩ افترض روجر بنروز أن المتفردة «تختفي» دائمًا وراء أفق الحدث. فباستثناء الانفجار العظيم، لا وجود لمتفردات ظاهرة. فأفق الحدث يمنع أي راصد من رؤية المادة تُسحق إلى كثافة لا نهائية. ولأن المتفردة تضع تحديات مفاهيمية كبيرة أمام النسبية العامة، فقد كان الفيزيائيون يأملون أن يكون للثقوب السوداء دائمًا أفق حدث. في عام ١٩٩١ راهن هوكينج اثنين من مُنظِّري معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وهما جون برِسكيل وكيب

ثورن، بمائة دولار على أن فرضية الرقابة الكونية صحيحة وأن المتفردات الظاهرة لا وجود لها. لكن في عام ١٩٩٧ أظهرت عمليات المحاكاة عبر كمبيوتر فائق أنه بتوافر ظروف معينة، قد يؤدي الثقب الأسود المنضغط إلى متفردة ظاهرة تسببها الطبيعة أو ربما سببتها حضارة متقدمة. اعترف هوكينج بخسارته للرهان، ودفع لزميليه المائة دولار وأهداهما قمصانًا مكتوبًا عليها: «الطبيعة تمقت المتفردة».

في السنة نفسها راهن هوكينج برسكيل على أن المعلومات تُدمَّر في الثقب الأسود (غيَّر ثورن انحيازه هذه المرة وانضم إلى هوكينج في هذا الرهان)، و«المعلومات» في هذا السياق ترتبط بالإنتروبيا؛ حيث الكثير من الإنتروبيا يعني فوضى وكمية قليلة من المعلومات. على سبيل المثال، الغاز العادي يتَّسم بفوضى عارمة ولا يتطلَّب سوى معلومات قليلة لوصفه، هي الكثافة ودرجة الحرارة والتركيب الكيميائي. وفي كل ثقب أسود إنتروبيا هائلة، أكثر بكثير من كرات الغاز التي تُشكِّله، وبالتالي تصفه معلومات أقل من نظيرتها التي يتطلبها الغاز، حيث كل ما نعرفه عن الأخير هو كتلته ودورانه.[٣٩] ومع ذلك يمكن للمرء – نظريًّا – أن يصنع ثقبًا أسود بعدد هائل من الطرق المختلفة، مثلًا عن طريق سحق الغازات أو الصخور معًا، أو ربما بكتب أو أزواج من الجوارب غير المتماثلة، ولكن لا يمكنه أن يرى هذه المعلومات من الخارج. ثم يتبخر الثقب الأسود مع إطلاق الإشعاع الفوضوي المضطرب. ماذا يحدث لجميع المعلومات المتعلقة بسبب نشوء الثقب الأسود من الأساس؟ أصبحت هذه المعضلة تُعرَف باسم «مفارقة المعلومات».

في عام ٢٠٠٤ أقرَّ هوكينج بخسارة هذا الرهان أيضًا، ففي مؤتمر عُقِدَ في دبلن غيَّر موقفه السابق وقال إن المعلومات يمكن أن تنجح في المرور عبر الثقب الأسود بسلام، وإن كان ذلك في شكل مُشوَّه. سيكون الأمر أشبه بأن يحرق المرء موسوعة ما، ثم يجد بقايا ضئيلة من المعلومات وسط بقايا الرماد والدخان. وربما يمكن لعمليات حسابية بارعة أن تُعيد بناء ذلك النصَّ الذي احترق. حافظ هوكينج على مبادئ ميكانيكا الكم، لكنه قضى على تكهُّنات سابقة كانت تتوقع أن المعلومات قد لا يتم حفظها داخل الثقب الأسود وحسب؛ بل ربما تنتقل إلى أكوان أخرى متفرعة من الثقب الأسود. وقال لصحيفة نيويورك تايمز: «آسف لإحباط مُحبي الخيال العلمي، ولكن حتى لو كانت المعلومات تُحفَظ، فلا توجد إمكانية لاستخدام الثقوب السوداء للسفر إلى أكوان أخرى».[٤٠] كان هوكينج يشير إلى فكرة في علم الكونيات مفادها أن الحالة السابقة للانفجار العظيم قد

تكون قد أنشأت عددًا كبيرًا من الأكوان، مضيفًا فكرة أن الثقوب السوداء قد تتيح تدفق المعلومات بين الأكوان. ووفاءً لرهانه أعطى هوكينج لصديقه برسكيل موسوعة للعبة البيسبول، والتي «يمكن له أن يستردَّ منها المعلومات بكل سهولة»، ووصف رأيه الأوليّ الذي يقول بضياع المعلومات في الثقب الأسود بأنه «خطؤه الأكبر».[٤١]

التقيت ستيفن هوكينج لقاءً وجيزًا عندما كنت طالبَ دراسات عليا في أواخر سبعينيات القرن الماضي، كان يُلقي محاضرة عن الثقوب السوداء في لندن بمناسبة تقلُّده منصب أستاذ الكرسي اللوكاسي للرياضيات. كان هوكينج في السادسة والثلاثين من عمره وكان في أوج عطائه كعالم فيزياء. كان مُقعدًا يستخدم كرسيًّا متحركًا منذ عشر سنوات، وحديثه قد تدهور لدرجة أنه لم يكن يفهمه سوى بعض أفراد العائلة والزملاء المقربين فقط. وكان أحد تلاميذه يقرِّب رأسه من هوكينج ليتمكن من سماع كل عبارة، ثم ينقلها إلى الجمهور. أتذكر ذلك الشعور الجارف الذي غمرني في نهاية المحاضرة، وفكرت أنه مهما كانت العوائق التي قد أواجهها في حياتي أو عملي، ستكون هيِّنة مقارنة بما واجهه هوكينج.

بعد عشرين عامًا ذهبت أنا وابن عمي لرؤيته يلقي محاضرة عامة في قاعة كبيرة في كامبريدج، كانت المحاضرة قد أُعِدَّت مقدمًا وتم تقديمها بواسطة جهاز التصنيع الصوتي الذي أصبح علامة مميزة له. سارت فترة الأسئلة ببطء لأنه اضطر إلى استخدام إصبع واحد لاختيار العبارات من مجموعة من آلاف العبارات المخزَّنة على جهاز الكمبيوتر. وكان حِسُّه الفكاهي الحاد واضحًا للغاية، فعندما سأله أحدهم: «هل سنتمكن من استخدام الثقوب السوداء لإنقاذ البشرية من الدمار؟»، توقف لهنيهة ثم ضغط على لوحة المفاتيح فصدح الصوت الإلكتروني قائلًا: «آمل ألا يحدث ذلك.»، ثم طُرِحَ سؤال آخر: «هل يمكن لشخص ما النجاة إذا ما سقط في ثقب أسود؟» فضغط على الإجابة ببطء: «ربما أنت تستطيع، ففيَّ ما يكفيني».

الجواب الحقيقي على هذا السؤال الثاني هو أن ذلك المسافر سيئ الحظ الذي سيقع في ثقب أسود لن ينجو منه؛ لأن قوة الجاذبية الهائلة في هذه الثقوب سوف تحوِّله إلى ما يشبه أعواد المعكرونة، تتناقص الجاذبية بمقدار مربع المسافة عن الجسم، بالنسبة لأي جسم مُدمَج مثل الثقب الأسود، يمكن أن يكون الفرق في قوة الجاذبية بين نقطتين على مسافات مختلفة من الجسم كبيرًا؛ فهذه قوى موجيَّة.[٤٢] على مسافة ثلاثة آلاف كيلومتر، ستخلق قوة التمدُّد تسارعًا بين رأسك وأصابع قدميك يساوي

جاذبية الأرض. هذا وضع غير مريح ولكن يمكن للمرء أن ينجو منه. أما على مسافة ألف كيلومتر ستساوي قوة التمدُّد خمسين ضعف جاذبية الأرض، ومن ثمَّ ستتمزق عظامك وأعضاؤك الداخلية. وعلى بُعد ثلاثمائة كيلومتر – وهي مسافة تعتبر أيضًا بعيدة عن أفق الحدث - تساوي قوة التمدُّد ألف ضعف جاذبية الأرض، وهي الكافية لتدمير الأجسام الصلبة. لا تشبه «التأثيرات المعكرونية» لعبة الأطفال، حين يقوم شخص ما بشدِّ قدميك وشخص آخر بشدِّ ذراعيك، أو حتى التعذيب بالمخلعة الذي كان يتم في القرون الوسطى، وإنما تعني أن الزمكان ينحني بالقرب من الثقب الأسود؛ لذا تتمدَّد ألياف الجسد العضلية وخلاياه وسلاسل حمضه النووي.

وهذا هو ما يصنع المفارقة؛ فأفق الحدث نقطة لا عودة، هو غشاء للمعلومات، تدخله المعلومات ولا تخرج. إذا استطعت الغوص في ثقب أسود حاملًا ساعة رقمية وتجنبت بطريقة أو بأخرى التأثيرات المعكرونية، فستبدو الساعة وكأنها تعرض الوقت الطبيعي بينما تسقط عبر أفق الحدث سقوطًا حرًّا. في هذه الأثناء سيشاهد رفيق لك يراقبك ساعتك تبطئ بينما تقترب صورتك المُشوَّهة ببطء من أفق الحدث، إلى أن تتوقف أنت وساعتك عن الحركة. الآن تخيل أننا رمينا كتابًا في ثقب أسود، تقضي قوانين الجاذبية بأنه سيعبر أفق الحدث، وستُفقَد معلوماته. لكن بالنسبة لأي راصد خارجي، لن يصل الكتاب أبدًا إلى أفق الحدث. هل فُقِدَت المعلومات أم أنها «خُزِّنت» بطريقة ما في أفق الحدث؟

بيد أن هناك رهانًا واحدًا كان هوكينج سعيدًا بأنه خسره، وهو رهانه الأول مع كيب ثورن الذي حدث عام ١٩٧٥، كان رهان هوكينج على عدم وجود الثقوب السوداء أشبه بوثيقة تأمين، فقد كان يأمل في أن يخسر، لكنه لو فاز بالرهان سيجد العزاء في اشتراك لمدة أربعة أعوام في المجلة البريطانية الساخرة «برايفت آي». وكما سنرى في الفصل التالي، ثبُتَ أن مصدر الطاقة العالية «نجم الدجاجة إكس-١» (Cygnus X-1) هو مُرشَّح قوي لأن يكون ثقبًا أسود؛ لذا اعترف هوكينج بخسارة الرهان في عام ١٩٩٠، وكانت جائزة كيب ثورن اشتراكًا لسنة كاملة في مجلة «بنتهاوس» الإباحية.[٤٣]

العصر الذهبي لنظرية الثقوب السوداء

أعقب اكتشافات هوكينج التاريخية، تسارعٌ هائل في وتيرة الأبحاث في مجال

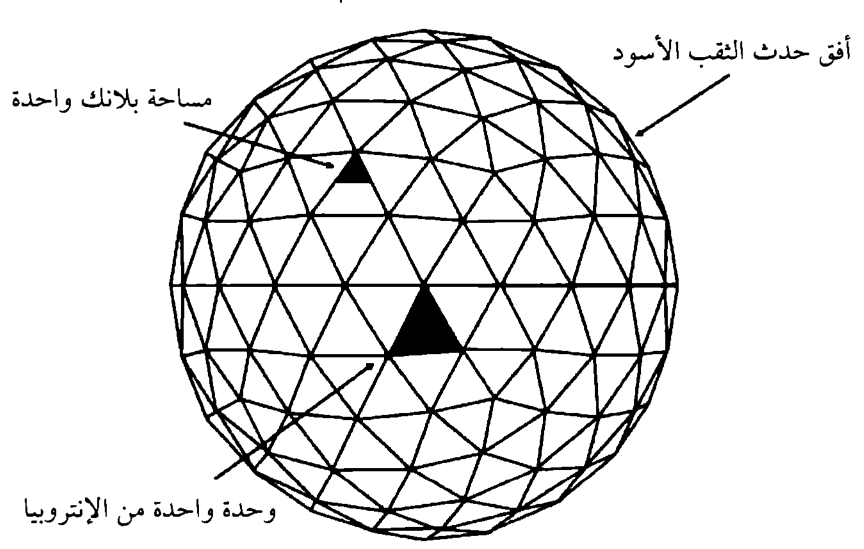
الثقوب السوداء، إننا نعيش حاليًّا العصر الذهبي لنظرية الثقوب السوداء، في ظل ذلك العدد الضخم من الأبحاث التي تُنشَر كل عام، يحاول الفيزيائيون التوفيق بين التوصيف «السلس» للأجسام في النسبية العامة والتوصيف «الخشن» للمادة في نظرية الكم.

واحدة من كبرى المعضلات - كما ذكرنا سابقًا – المتعلقة بهذا الأمر هي السؤال عمَّا يحدث للمعلومات في أفق الحدث، لقد وصلت نظرية هوكينج التي تشرح تبخُّر الثقب الأسود إلى مجموعة الأدوات التي تستخدمها ميكانيكا الكم. وقد أشار في الأصل إلى أن الإشعاع الناتج من الثقب الأسود يكون فوضويًّا وعشوائيًّا، وعندما يُبخِّر الثقب الأسود جميع المعلومات الموجودة فيه، هنا تضيع تلك المعلومات. وهو الأمر الذي ينتهك فرضية جوهرية في نظرية الكم، تقضي بأن تفاعلات الجسيمات قابلة للعكس الزمني، وبهذا الشكل سيتأتى لنا تشغيل الفيلم بالعكس واستعادة الحالة الأوليَّة من الحالة النهائية. وهذا التصادم بين نظريتين ناجحتين بشكل كبير في الفيزياء - النسبية العامة وميكانيكا الكم - اعتبره معظم الفيزيائيين وقتها أزمة.

في عام ١٩٩٦ استخدم آندي سترومنجر وكومرون فافا نظرية الأوتار لإعادة إنتاج إنتروبيا وإشعاع هوكينج.[٤٤] تعد نظرية الأوتار محاولة امتدت لعقود من أجل توحيد قوى الطبيعة الأربع مع مفهوم المادة، ليس في صورة جزيئات وإنما «كأوتار» طاقة أحادية البعد صغيرة موجودة في الزمكان الذي قد يحتوي على ثمانية أو عشرة أبعاد. وتعتبر نظرية الأوتار أكثر اعتمادًا على الأساسيات من نظرية الكم العادية؛ لأنها تفترض كيانًا واحدًا يمثل أساس الجسيمات المتنوعة، مثل الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. كما أنها جذابة لأنها أنيقة من الناحية الرياضية، برغم صعوبة اختبارها. ومع ذلك كان شيئًا مثيرًا للاهتمام عندما فسَّرت النظرية بعض الخصائص المهمة للثقوب السوداء؛ لأن هذا كان أول نجاح لنظرية ميكروسكوبية للمادة في عالم الجاذبية القوية. افترض بحث سترومنجر وفافا إمكانية استرجاع المعلومات من الثقب الأسود، ومع ذلك لا يوجد اتفاق واضح على الكيفية التي تُحفَظ بها المعلومات، أو على ما يمكن أن تخبرنا به نظرية الأوتار عن طبيعة الثقوب السوداء.

يعمل كثير من علماء الفيزياء الأفذاذ على حل هذا اللغز.[٤٥] وتفترض إحدى الأفكار المثيرة للاهتمام أن المعلومات تُخزَّن في أفق الحدث، بالطريقة نفسها لتخزين الهولوجرام، الذي هو مخزن ثنائي الأبعاد لصورة جسم ثلاثي الأبعاد. فإذا ما كانت المعلومات الخاصة بمحتويات الثقب الأسود مشفَّرة بطريقة ما على السطح (شكل ٩)،

فإن هذا من شأنه أن يحل مفارقة المعلومات. وفي عام ٢٠١٢ جاء اكتشاف مزعج مفاده أن الجسيمات الافتراضية المسئولة عن إشعاع هوكينج متشابكة، وتتشارك في حالات كميَّة حتى عندما تكون منفصلة بشكل واسع. والحصول على المعلومات عن طريق كسر التشابك سيؤدي إلى إطلاق سيل من الإشعاع، مما يخلق «جدار حماية» فوق أفق الحدث. وبدلًا من خوض رحلة هادئة في الهاوية المظلمة، سوف يُمحَى المسافر في الثقب الأسود بسبب جدار الحماية هذا. ولكن كما رأينا من الخارج، يظل المسافر محصورًا في أفق الحدث كحشرة على ورقة صيد الذباب. هل يموت أم ينجو؟ لا شيء يمكنه أن يخرج، ولكن لا شيء يمكن أن يدخل. ولا يزال الباحثون يتجادلون حول ما إذا كانت جدران الحماية تلك أمرًا مؤكدًا أم لا.



شكل ٩: تتناسب إنتروبيا الثقب الأسود مع مساحة أفق الحدث. يمكن اعتبار الإنتروبيا أيضًا معلومات. تساوي أصغر وحدة أو «البت» من المعلومات مساحة بلانك واحدة، ويتم تحديدها من خلال سرعة الضوء وقوة الجاذبية وثابت بلانك. يبدو الأمر كما لو أن محتويات الثقب الأسود تُكتَب في أفق الحدث كوحدات معلوماتية صغرى.

«كريس إمبي»

توضح هذه المناقشة انحسار وتدفق الأفكار في أفضل مراحل نظرية الثقب الأسود، دعنا نترك الكلمة الأخيرة حول هذا الموضوع لأندي سترومنجر. ففي بحث نُشِرَ عام ٢٠١٦ بعنوان «الشعر الناعم الموجود على الثقوب السوداء»، والذي شاركه

هوكينج في كتابته، عارض نظرية جون ويلر المسماة بنظرية «اللاشعر» وحدد جسيمات قد تعمل كوحدات بكسل كمومية لتخزين المعلومات عند حدود الثقب الأسود. وما زال العمل على هذه النظرية جاريًا. يقول سترومنجر مُقِرًّا: «لديَّ قائمة تضم ٣٥ معضلة على السبورة، يستغرق حل كل واحدة منها عدة أشهر. وإذا كنتَ متخصصًا بالفيزياء النظرية سترى ذلك أمرًا جيدًا ومرحلة لطيفة تمر بها، صحيح أن هناك أمورًا لا تفهمها، لكن هناك حسابات يمكنك أن تُجريها، حسابات ستزيل غموض هذه المعضلات بكل تأكيد».[٤٦]

على مدى المائة عام الماضية تطورت الثقوب السوداء من فكرة خرافية تنتهك المنطق، إلى أساس صلب ترتكز عليه أكثر نظرية فيزيائية قوبلت بحفاوة، تعتبر الثقوب السوداء هدية من الكون؛ فهي لها ثِقَل، ولكن محتوياتها مخفيَّة وغامضة. بل إن غلافها نفسه مثير للدهشة لدرجة تتطلب دراسته، إنني أتذكر العبارة التهكميَّة التي قالها مارك توين: «إن في العلوم ما يخلب لبَّ المرء. فمنها يخرج المرء بمجموعة كبيرة من التخمينات بعد أن يستثمر في الحقيقة استثمارًا عبثيًّا».

والآن قد حان الوقت لطرح هذا السؤال البراجماتي: هل توجد ثقوب سوداء بالفعل؟

الفصل الثاني

ثقوب سوداء من موت النجم

يعتمد العلم على التفاعل بين النظرية والمشاهدات، وعلى مدى آلاف السنين ما فتئ البشر تراودهم الكثير من الأفكار الخيالية حول كيفية عمل الكون، ولكن دون بيانات مستقاة من المشاهدات، تظل حتى أذكى الأفكار ضربًا من التخمينات. أهناك بالفعل دليل واقعي على إمكانية اختفاء الكتلة من مشهد الكون؟

إن الثقوب السوداء حقيقية رغم صعوبة تخيُّلها، وهذا هو الاستنتاج الثابت الذي خرجنا به من نحو خمسين عامًا من الدراسات التي تبحث في مصائر النجوم النهائية، إن الثقب الأسود المنفرد دائمًا غير مرئي على الإطلاق. والتمزُّق الذي يخلقه في الزمكان ضئيل للغاية لدرجة أنه لا يمكن اكتشافه بأي تلسكوب، ولكن معظم النجوم موجودة في أنظمة ثنائية أو متعددة؛ لذا يمكن للنجم المرئي أن يكون مؤشرًا على رفيقه المظلم.

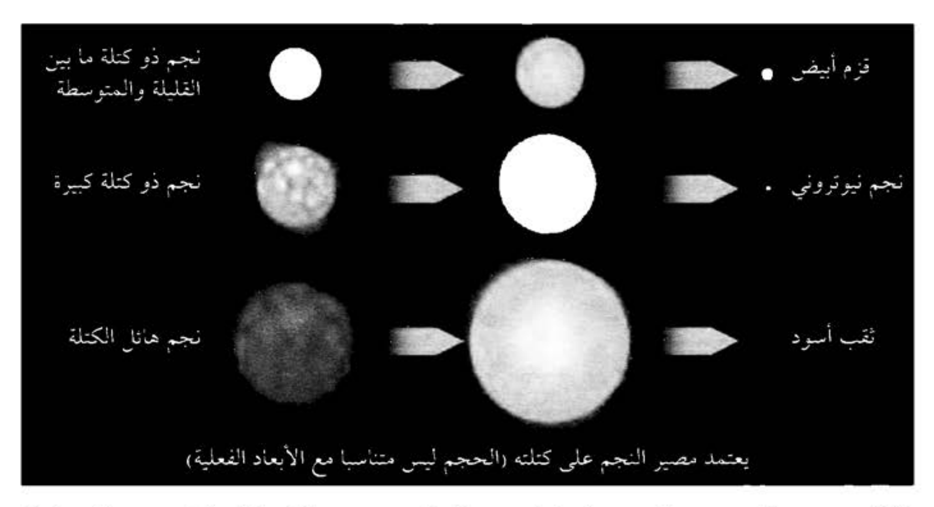
قوى النور والظلام

قد يصعب على المرء تصديق أنه عندما ينظر إلى الشمس يشاهد معركة هائلة بين قوى النور والظلام، ورغم أن مظهر الشمس لا يكاد يتغيَّر من يوم لآخر أو من سنة لأخرى، فإن الجسيمات تتدفق بسرعة قريبة من سرعة الضوء، ولا تفتأ حزم البلازما التي يبلغ حجمها حجم كوكب تتماوج بعنف وباستمرار؛ فهي عبارة عن فرن نووي محكوم حراريًّا، وفي كل نقطة بداخلها يوجد توازن بين قوة الجاذبية الداخلة وقوة الإشعاع الخارجة المنطلقة من اندماج الهيدروجين ليتحول إلى هيليوم.[١] وطالما بقي الوقود اللازم لعملية الاندماج الذرِّي، لا تنتصر قوة على الأخرى.

لو أردت رهانًا رابحًا على النتيجة النهائية لهذه المعركة على المدى الطويل، فستكون الجاذبية اختيارًا ذكيًّا؛ فالوقود النووي محدود لكن الجاذبية سرمدية، وبعد يُستَنفَد الهيدروجين من النجوم كما يحدث في الشمس، يُفقَد الضغط الداخلي وينضغط

لبُّ النجم ليستحيل أكثر سخونة وأعلى كثافة لدرجة يمكن معها أن يندمج الهيليوم ليتحوَّل إلى كربون. يحدث هذا التفاعل بسرعة، وعندما يُستَنفَد الهيليوم، لا يمكن أن ترتفع درجة الحرارة بدرجة كافية لإحداث تفاعلات نووية جديدة. ويُفقَد الدعم الناجم عن الضغط ويواجه لبَّ النجم مرة أخرى انضغاطًا جذبويًّا. ستمر الشمس بطور قصير من «الألعاب النارية»، حيث تُستخدم آخر كميات الوقود فيها، مُطلِقَة ثلث كتلتها في قذيفة من الغاز تتحرك بسرعة تفوق سرعة الصوت. وترتفع درجة حرارة الغاز سريع الحركة ويضيء، منتِجًا أشكالًا رائعة من السديم الكوكبي، وأي شخص يشاهد الشمس من نظام نجمي آخر على بُعد ٥ مليارات سنة سيشهد عرضًا ضوئيًّا رائعًا، أما من يشاهدها من الأرض فهو في مشكلة كبيرة؛ لأن الغاز المقذوف سيبخر المحيط الحيوي ويمحو الحياة.

إن حياة النجم وموته تتحكم فيهما كتلته (شكل ١٠)، وجميع مصائر النجوم المختلفة محتومة منذ ولادتها، فعلى حسب كتلتها ستصبح كل النجوم إما أقزامًا بيضاء أو نجومًا نيوترونية أو ثقوبًا سوداء، وليس للنجم كتلة أو حجم «نموذجي»، رغم أن العملية التي تتكون النجوم من خلالها من سحب الغاز الفوضوية تُنتج من النجوم الصغيرة ما يفوق عدد النجوم الكبيرة بفارق كبير. والشمس أقرب إلى النجوم الصغير من النجوم الكبيرة، وتليها في الحجم نجوم قاتمة تسمى بالأقزام الحمراء. ويوجد من الأقزام الحمراء مئات أضعاف ما يوجد من نجوم مثل الشمس. ويتحدد عمر النجم أيضًا من خلال كتلته؛ لأن الجاذبية تحدد درجة حرارة لبِّ النجم، والتي تشير بدورها إلى مدى سرعة حدوث التفاعلات النووية، وبالتالي طول مدة توافر الوقود النووي. إن نجمًا مثل الشمس سيدمج الهيدروجين ويحوله إلى هيليوم لـ ١٠ مليارات سنة؛ وقد قطعنا حتى الآن نصف هذا المدى العمري.[٢] ويبلغ عمر النجم الذي تساوي كتلته نصف كتلة الشمس ٥٥ مليار سنة، ومن ثم فإنه لم يمت أي نجم له هذه الكتلة في تاريخ الكون، الذي يبلغ عمره ١٤ مليار سنة فقط. والقزم الأحمر الذي تبلغ كتلته عُشر كتلة الشمس، والذي يمكن بالكاد اعتباره نجمًا - إذ لا تزال تفاعلات الاندماج النووي تحدث على سطحه - سيستخدم وقوده بشُحٍّ بالغ. سيعيش هذا النجم نظريًّا لأكثر من تريليون سنة، وهي فترة زمنية طويلة بشكل لا يمكن تصوُّره، ومع ذلك فإن النجم القزم يؤخر فقط الأمر المحتوم؛ لأنه لا بد أن ينفد الوقود في يوم ما، ولا بد أن ينطفئ هذه الضوء الخافت، وستحصل الجاذبية على مكافأة صبرها.



شكل ١٠: يتوقف مصير النجم على كتلته. معظم النجوم - بما في ذلك الشمس - ذات كتلة منخفضة إلى متوسطة، وبعد نفاد وقودها النووي سوف تموت وتتحول إلى ما يشبه الجمرات الباردة المسماة «الأقزام البيضاء». أما النجوم الأكثر ضخامة فتمتلك قدرًا أكبر من الوقود ولكن عمرها أقصر، وستموت كنجوم نيوترونية أو ثقوب سوداء.

«مركز شاندرا للعلوم» بوكالة ناسا

أما النجوم الأكثر ضخامة من الشمس فتتسم بعمر أقصر ودورة حياة أكثر عجبًا، وكلها يفعل ما تفعله الشمس الآن – فكلها يدمج ذرات الهيدروجين ويحولها إلى هيليوم – ولكنها تتمتع بجاذبية أكبر، ومن ثَمَّ فلُبُّها أعلى حرارة ممَّا يجعلها تستهلك وقودها بشراهة. كلما كان النجم أكثر ضخامة، كانت درجة حرارة لُبِّه أعلى وكان عمره أقصر. وتستطيع النجوم الضخمة دمج ذرات جميع العناصر الموجودة في الجدول الدوري وتحويلها إلى حديد، الذي هو العنصر الأكثر استقرارًا. وعندما تتوقف التفاعلات النووية عند الحديد، يصبح لُبُّ النجم في حالة فيزيائية غريبة؛ حيث يستحيل إلى بلازما حديدية تزيد كثافتها عن كثافة الماء بمائة مرة لحظة أن يغلي عند درجة حرارة تبلغ مليار درجة. ودون ضغط من اللبِّ ينهار النجم، وتنعكس موجة الضغط نحو الداخل إلى موجة انفجارية بمليار درجة نحو الخارج، حيث تندمج فيها العناصر الثقيلة وصولًا إلى اليورانيوم في أجزاء من الثانية، وهو ما يُعرف بالـ «مستعر أعظم» (أو السوبرنوفا)، وهو أحد أكثر الأحداث دراماتيكية في الكون. وتندفع المعادن الثمينة في الفضاء لتصبح جزءًا من الجيل القادم من النجوم والكواكب، ويتم طرد قدر كبير من الكتلة الأصلية للنجم، ولكن ما يتبقى يظل محصورًا بقوة في قبضة الجاذبية الصارمة.

الجاذبية والظلام ينتصران في النهاية

تعد بقايا النجوم حالات غريبة من حالات المادة حقًّا، وليس لدينا أي وسيلة لتصنيعها معمليًّا، كل ما يمكننا فعله هو أن نستخدم قوانين الفيزياء ونأمل أن تكون نظرياتنا قوية بما يكفي لأداء هذه المهمة، وقد انشغل بعضٌ من أفضل العقول في مجال الفيزياء الفلكيَّة في القرن العشرين بمحاولة فهم بقايا النجوم.

تعتمد الآثار المتخلفة وراء النجم على الكتلة التي كان يمتلكها النجم في بداية حياته، تُولد النجوم من تجزئة وانضغاط غيوم الغازات الكبيرة التي تُنتَج من النجوم صغيرة الكتلة أكثر ممَّا تنتج من النجوم كبيرة الكتلة. تفقد جميع النجوم جزءًا من كتلتها مع تقدُّمها في العمر، وتتسم العمليات التي يحدث بها هذا الأمر بالتعقيد، ولذلك فلا تتسم الحدود الواقعة بين النتائج المختلفة بالدقة. إن النجوم التي تبدأ حياتها بكتلة أقل من كتلة الشمس بثماني مرات تنضغط وتتحول إلى حالة كثيفة غير معتادة تسمى «القزم الأبيض». والغالبية العظمى من النجوم أقل حجمًا من الشمس، ومن ثمَّ فإن أكثر من ٩٥٪ من جميع النجوم سينتهي الأمر بها إلى هذه الصورة. على سبيل المثال، سوف تفقد الشمس نحو نصف كتلتها خلال مرحلة «الألعاب النارية» الأخيرة قبل أن تموت كقزم أبيض.

في عام ١٧٣٨ اكتشف عالم الفلك الإنجليزي ويليام هيرشل صدفة نجمًا اسمه «القيض ٤٠ ب» (40 Eridani B)، لكنه لم يمتلك وقتها أي وسيلة لقياس حجمه؛ لذلك لم يدرك أن هذا النجم كان غير عادي. وفي عام ١٩١٠ أعاد رُوَّاد الفضاء تركيز انتباههم على هذا النجم الخافت، الذي هو موجود ضمن نظام ثنائي. كشف مدار هذا النجم عن أن كتلته تساوي كتلة الشمس نفسها، فقد عرفوا كم يبعد، واستنتجوا أنه كان أكثر خفوتًا بعشرة آلاف مرة ممَّا كانت ستصير الشمس لو كانت على المسافة نفسها. مع ذلك كان نجمًا أبيض، ومن ثمَّ فإنه أكثر سخونة من الشمس. ولمعرفة السبب وراء كون هذا الأمر مُحيرًا، تخيَّل عيني موقد كهربائي ساخنتين، تتبديان في غرفة مظلمة. يتم تشغيل إحداهما على حرارة منخفضة فتُضاء باللون البرتقالي، مثل الشمس. ويتم تشغيل الأخرى بدرجة حرارة عالية فتصبح أكثر سخونة؛ لذلك أضاءت باللون الأبيض. العين الساخنة البيضاء أكثر إضاءة من العين الساخنة البرتقالية. ولكي تظهر العين البيضاء أكثر خفوتًا من العين البرتقالية، يجب أن تكون أصغر بكثير. وبالمنطق نفسه

كان ينبغي أن يكون النجم الخافت في نظام «القيض ٤٠» أصغر بكثير من الشمس. وبما أن له كتلة الشمس ذاتها، فلا بد أن يكون أكثر كثافة أيضًا.[٣]

انتهت حسابات إرنست أوبك إلى أن كثافة «القيض ٤٠ ب» يجب أن تكون أكبر من كثافة الشمس بـ ٢٥ ألف مرة، وهو الأمر الذي وصفه بأنه «مستحيل».[٤] وصف آرثر إدنجتون - الذي نشر مصطلح «القزم الأبيض» - ردود الأفعال المتشكِّكَة التي ثارت بفعل القزم الأبيض بقوله: «نتعرَّف على النجوم من خلال تلقِّي الرسائل التي يجلبها لنا ضوءها وتفسيرها.» كان فحوى الرسالة عندما تم فكُّ تشفيرها هو: «أنا مؤلَّف من مادة أكثر كثافة بثلاثة آلاف مرة من أي شيء صادفتموه على الإطلاق؛ فالطن من المادة التي أتكون منها هو عبارة عن شذرة يمكنكم وضعها في صندوق الثقاب». كيف عسانا أن نردَّ على مثل هذه الرسالة بالرد المناسب؟ كان رد معظمنا عليها عام ١٩١٤ هو: «اسكت، ولا تتحدث بهذا الهراء».[٥]

لم يكن إدنجتون رجلًا متواضعًا، حتى إنه عندما قال له أحد الزملاء: «بروفيسور إدنجتون، لا بد أنك واحد من ثلاثة أشخاص فقط في العالم يفهمون النسبية»، سكت لهنيهة، فأردف زميله: «لا تكن شديد التواضع». فأجاب إدنجتون: «على النقيض من ذلك، إنني أحاول أن أفكر مَن يكون ذلك الشخص الثالث».[٦] ورغم أن إدنجتون كان خبيرًا في الفيزياء الفلكيَّة، وهي التي تنبأت بالأقزام البيضاء، فإنه وصفها بأنها «نجوم مستحيلة».

إن القزم الأبيض التقليدي هو نجم حجمه حجم الأرض، لكن كتلته هي كتلة الشمس ذاتها، وكثافته أعلى مليون مرة من كثافة الماء. فمع انعدام انطلاق أي طاقة من عمليات الاندماج النووي، وهو ما يعني انعدام انطلاق أي ضغط نحو الخارج، تتسبب الجاذبية في تقليص الغاز، وسحق البنية الذريَّة وتشكيل بلازما من نُوى وإلكترونات حرة. فقط عند هذه النقطة تتوقف الجاذبية للمرة الأخيرة. في عام ١٩٢٥ توصل فولفجانج باولي إلى مبدأ الاستبعاد، الذي ينصُّ على أنه لا يمكن لاثنين من الإلكترونات أن يتصفا بمجموعة الخصائص الكمومية ذاتها بالضبط. ويتمثل تأثير هذا المبدأ في توفير الضغط الذي يمنع الجثمان النجمي من الانضغاط أكثر من هذا.[٧] يتشكَّل القزم الأبيض تحت درجة حرارة تصل إلى مائة ألف كلفن، ثم بعدها يبدأ يشع حرارته بثبات في الفضاء، ثم يبهت حتى يصير أسود.

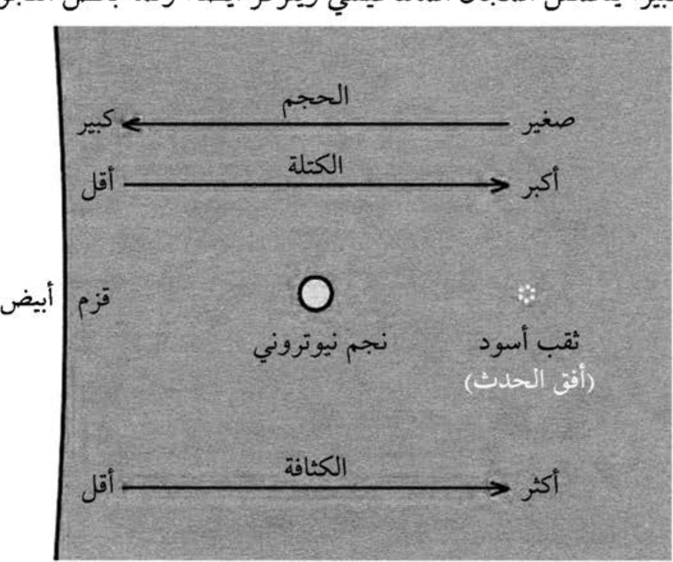
في ذلك الوقت كان سابرامانين تشاندراسخار طالبًا جامعيًّا يبلغ من العمر تسعة عشر عامًا، ويدرس في كامبردج بمنحة حكومية هندية، وقد خلصت حساباته إلى أنه بغض النظر عن الكتلة الأوليَّة للنجم، فإن بقاياه كقزم أبيض لا يمكن أبدًا أن تكون أكبر من كتلة الشمس بنحو ١٫٤ مرة. فإذا ما زادت الكتلة عن هذا، ستتفوق الجاذبية على ميكانيكا الكم، وينضغط النجم ليستحيل متفردة؛ لذلك فقد صارت الكتلة القصوى للقزم الأبيض تسمى «حد تشاندراسخار».[٨] كانت عملية حسابية بارعة تلك التي أجراها تشاندراسخار؛ لذلك فقد كان الإحباط الذي أصابه عندما سخر آرثر إدنجتون – مثله الأعلى – من فكرة انضغاط النجم ليستحيل إلى متفردة أمرًا مفهومًا. أحسَّ تشاندراسخار بأنه تعرَّض لطعنة غادرة، معتقدًا أن هذه السخرية كانت العنصرية جزءًا من دوافعها. إننا نحب أن نعتقد أن العلماء يتحصَّلون على مكانتهم العلمية عن طريق جدارتهم، لكن الحقيقة أنهم أحيانًا ما يكونون غيورين وضيِّقي الأفق. (حتى إن بول ديراك رائد ميكانيكا الكم، والذي واجه مقاومة مماثلة، أشار إشارة ذكية إلى أنه كلما انتهت جنازة لواحد من أولئك المعارضين، تقدم العلم خطوة). لكن في نهاية المطاف ثَبَتَت صحة حسابات تشاندراسخار، وحصل على جائزة نوبل في الفيزياء لمجهوداته في التنظير لبنية النجوم وتطورها.

لقد فتح تشاندراسخار الباب أمام علماء الفيزياء لتخيُّل ما قد يحدث إذا ما انضغط نجم ما لما هو دون القزم الأبيض. وبعد بضع سنوات اقترح فالتر بادي وفريتز زفيكي - عالما الفلك اللذان يقطنان كاليفورنيا – فكرة تكاد تكون عابرة، مفادها أنه فوق حد تشاندراسخار، قد تنتج مادة نيوترونية نقية من انضغاط النجوم، لكنهما لم يقدما أي حسابات تدعم هذا الحدس. وفي عام ١٩٣٩، قام روبرت أوبنهايمر - المدخن الشره صعب المراس - بإجراء هذه الحسابات. فبالتعاون مع أحد طلبة الدراسات العليا، قام بحساب نطاق الكتلة للنجوم النيوترونية.[٩] وفي السنة نفسها، كما عرفنا من قبل، أوضح أنه بوجود البقايا النجمية فوق نطاق الكتلة هذا – والذي يبلغ أكثر من ثلاثة أضعاف كتلة الشمس - لا بد أن يتشكَّل ثقب أسود.

تفقد كل النجوم جزءًا من كتلتها قبل أن تموت. وكما ذكرنا سابقًا، ستخسر الشمس نصف كتلتها قبل أن تموت كقزم أبيض، وكل النجوم التي تبدأ حياتها بكتلة تصل إلى ٨ أضعاف كتلة الشمس سوف تُخلِّف وراءها أقزامًا بيضاء ذات كتل تصل إلى ١٫٤ ضعف كتلة الشمس. وإذا كانت الكتلة الأوليَّة للنجم تتراوح تقريبًا ما بين

٨ أضعاف و٢٥ ضعفًا لكتلة الشمس، فإن انضغاط اللُّبِ سيستمر حتى تندمج كل البروتونات والإلكترونات لتكون مادة نيوترونية نقية.[١٠] ونظرًا لعدم وجود قوة كهربية، تتزاحم النيوترونات بجوار بعضها بعضًا كبيض مُكدَّس في صندوق. تدعم القوة النووية القوية مع صورة أقوى من القوة الكمومية - التي تمنع الأقزام البيضاء من الانكماش أكثر - المادة ضد المزيد من الانضغاط. هذا هو النجم النيوتروني، الذي هو أصغر أنواع النجوم وأكثرها كثافة في الكون. أما عند زيادة الكتلة عن الـ ٢٥ ضعفًا لكتلة الشمس، سيظهر أمامنا احتمال ظهور وحش من وحوش أينشتاين (شكل ١١).

تتحدى النجوم النيوترونية الخيال.[١١] فالنجم النيوتروني يشبه نواة ذريَّة بحجم مدينة ذات عدد ذريٍّ يبلغ ١٠^٥٧. ومادته أكثر كثافة بألف تريليون ضعف لكثافة الماء؛ لذلك فإن كمية بحجم مكعب السكر من مادة القزم الأبيض ستزن طنًّا واحدًا إذا ما جُلِبَت إلى الأرض، لكن كمية بحجم مكعب السكر من مادة النجم النيوتروني سيساوي وزنها وزن جبل إفرست إذا ما جُلِبَت إلى الأرض. عندما ينكمش النجم بهذا القدر الكبير، ينكمش المجال المغناطيسي ويتركز أيضًا. وثمة بعض النجوم النيوترونية



شكل ١١: كلما زادت كتلة النجم الأولية، صارت البقايا النجمية أصغر وأكثر كثافة بعد انتهاء عمليات الاندماج النووي. يُظهِر المنحنى الموجود على اليسار حجم القزم الأبيض. رغم أن النجوم النيوترونية والثقوب السوداء لا تفوق الأقزام البيضاء في الكتلة سوى ببضع أضعاف قليلة، فإن الرموز تبيِّن أنها أصغر وأكثر كثافة بكثير.

«باتريك لين/ كويستا كوليدج»

يحتوي على مجالات مغناطيسية أقوى من مجال كوكب الأرض بكوادريليون (مليون مليار) ضعف. والجاذبية بالقرب من السطح قوية للغاية لدرجة أن جسمًا يسقط من ارتفاع المتر سوف يتسارع إلى ٣ ملايين ميل في الساعة عند لحظة الاصطدام. ويعني الحفاظ على الزخم الزاوي أنه عادة ما يتضخم الدوران الثابت لنجم مثل الشمس عندما ينضغط هذا النجم. يدور أسرع نجم نيوتروني بسرعة ٧١٦ لفة في الثانية، أو ٤٢ ألف دورة في الدقيقة، وبالطبع مثل هذا الجسم الصلب سريع الدوران ليس مستقرًا بشكل كامل، وهو ما قد يؤدي بالقشرة الصلبة إلى أن تتحرك بعنف في حدث يسمى «الزلزال النجمي».

كيف يمكن اكتشاف نجم نيوتروني؟ ينبغي لهذه النجوم التي يبلغ حجمها حجم مدينة ألَّا تُصدِر أي ضوء؛ لأنها لا تقوم بدمج أي عناصر كما تفعل النجوم العادية؛ لذلك فعلى مدى عقدين من الزمن وضعها علماء الفلك في فئة الغرائب الفيزيائية الفلكية التي تندرج تحتها الأشياء التي يمكن تخيُّلها ولكن لم يرها أحد من قبل. ثم حدث في عام ١٩٦٧ أن رصدت طالبة الدراسات العليا جوسلين بيل وأستاذها في الدراسات العليا توني هيويش، نبضات راديوية ذات فترة تبلغ ١٫٣٣٧٣ ثانية صادرة من جسم مجهول في كوكبة الثعلب (Vulpecula). كانت النبضات قوية جدًّا ومنتظمة لدرجة أن بيل وهيويش ظنَّا أن مصدرها ربما يكون مصباح مركبة فضائية وامضًا؛ لذا فقد أطلقا عليه مازحين اسم "LGM-1"، اختصار لعبارة معناها «الرجال الخُضر الصغار». وسرعان ما اكتُشِفَت «نجوم نابضة» أخرى، وربطها بيل وهيويش بالتنبؤ السابق الذي يفترض أنها النجوم النيوترونية. إن المجال المغناطيسي الشديد يحفِّز انبعاثًا راديويًّا من البقع الساخنة الموجودة على سطح النجم النيوتروني، وعندما يطلق النجم النيوتروني الدوار هذا الانبعاث تجاه تلسكوب لاسلكي - على غرار إشارات المنارة - تصبح هذه النبضات مرئية.

لكن جدالًا شديدًا قد ثار بعد سبع سنوات عندما مُنِحَت جائزة نوبل عن اكتشاف النجوم النابضة إلى هيويش ومارتن رايل - رئيس المرصد الراديوي - دون جوسلين بيل، صاحبة الاكتشاف الحقيقية. وكان من الواضح للكثيرين في المجتمع العلمي أنها استُبعِدَت من الجائزة لأنها كانت امرأة شابة؛ فقد حصل ما يزيد عن ٢٠٠ عالم على جائزة نوبل في الفيزياء، لم يكن منهم سوى امرأتين فقط، وهما ماري كوري (عام ١٩٠٣)، وماريا جوبرت ماير (عام ١٩٦٣).[١٢]

مع عمليات المسح باستخدام التلسكوبات الراديوية زاد عدد النجوم النابضة باطراد إلى أكثر من ٣٠٠٠ نجم، ومع ذلك فإن الظروف التي تؤدي إلى وجود بقعة ساخنة على السطح نادرة؛ لذلك فإن قلَّة من النجوم النيوترونية هي نجوم نابضة، أما الغالبية العظمى من ملايين النجوم النيوترونية في المجرَّة تدور بهدوء في الفضاء السحيق والظلام دون أن تُرصَد.

اكتشاف أول بجعة سوداء

إنه العام ١٩٦٤ حين اجتاحت فرقة البيتلز أرجاء أمريكا كالعاصفة، وأصبح الملاكم الشاب المسمى كاسيوس كلاي بطل العالم في الوزن الثقيل. وكذلك كان العلم يزدهر؛ فقد ظهر مصطلح «الثقب الأسود» في الكتب لأول مرة في يناير من عام ١٩٦٤، وفي يونيو حدد صاروخ تجارب صغير انطلق من نيومكسيكو مصدرًا قويًا للأشعة السينية في كوكبة الدجاجة (البجعة). كان مصطلح «البجعة السوداء» هو المصطلح الذي أُطلِقَ على تلك الأحداث النادرة وغير المتوقعة التي لعبت دورًا غير متجانس في تطوير العلوم. (كما يستخدمه الفلاسفة للحديث عن مشكلة في الاستدلال مُلخصها أن رؤية عدد كبير من البجع الأبيض ليست دليلًا على انعدام البجع الأسود). وكان اكتشاف المثال الأول لبجعة سوداء في فيزياء الثقوب السوداء قد تمخَّض عن عمل استكشافي استغرق سبع سنوات.[١٣]

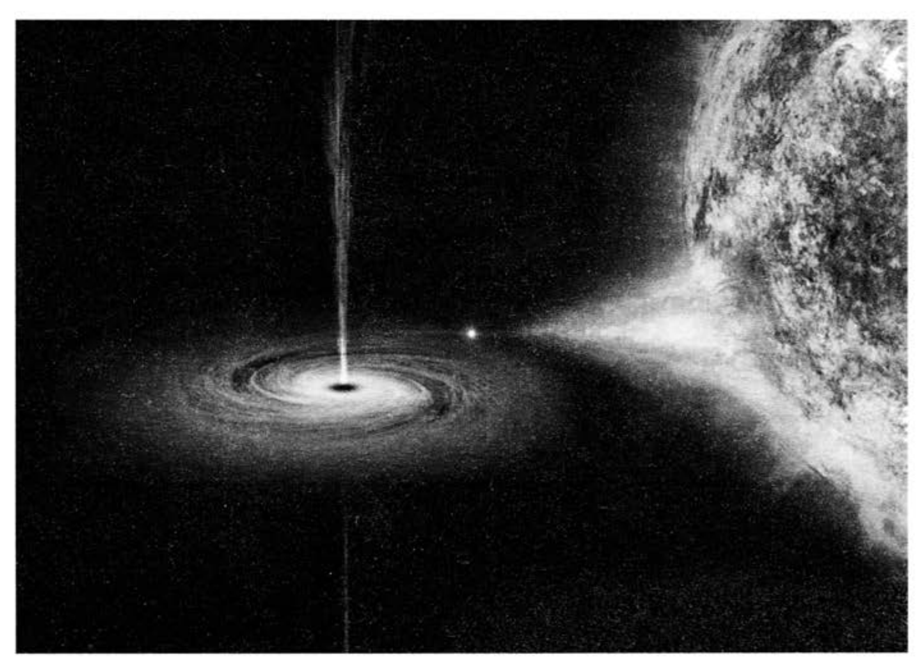
كان علم فلك الأشعة السينية مجالًا جديدًا في ستينيات القرن العشرين، لا يمكن الكشف عن الإشعاع عالي الطاقة القادم من المصادر الكونية إلا من الفضاء، وقد اكتُشِفَ أول مصدر له قبل ذلك بعامين فقط. كانت المصادر الثمانية التي رُصِدَت في عمليات الرصد عام ١٩٦٤ متَّسِقة مع بقايا المستعرات العظمى، أو الغاز الساخن الذي ينشأ عندما يموت نجم ضخم بصورة عنيفة.[١٤] كانت عمليات الرصد الاستكشافية سيئة من حيث الدقة المكانية؛ لذلك لم تضيِّق نطاق موقع الأشعة السينية المنبعثة من كوكبة الدجاجة إلى نطاق أصغر بكثير من الكوكبة نفسها. وفي عام ١٩٧٠ أظهر القمر الصناعي أوهورو الباحث عن الأشعة السينية أن كثافة شدة الأشعة السينية المنبعثة من «نجم الدجاجة إكس-١» تباينت في أقل من ثانية. يستخدم علماء الفيزياء الفلكية الزمن طريقةً لقياس حجم الأجرام البعيدة، والفكرة هي أن تغيرات الشدة لا يمكن أن تحدث بشكل أسرع من الزمن الذي يستغرقه الضوء لعبور مصدر الضوء. أشارت اختلافات

الشدة في «نجم الدجاجة إكس-١» إلى أن هذا الجرم لا يزيد حجمه عن ١٠٠ ألف كيلومتر، أي أقل من عُشر حجم الشمس.

حدد المرصد الفلكي الراديوي الوطني موقعًا دقيقًا في السماء كمصدر متغير للأشعة السينية، يتمثل في نجم أزرق عملاق يسمى «إتش دي إي ٢٢٦٨٦٨» (HDE 226868). والنجوم العملاقة هي نجوم ساخنة لكنها غير قادرة على بثِّ كميات كبيرة من الأشعة السينية. كان التفسير الوحيد لوجود الأشعة السينية هو أن شيئًا ما في تلك المنطقة من الفضاء كان يسخن الغاز إلى درجة حرارة تصل إلى ملايين الدرجات. وفي الخطوة التالية الحاسمة تم استخدام تقنيات بصرية؛ ففي عام ١٩٧١ أخذت مجموعتان من العلماء طيفًا من العملاق الأزرق، ووجدتا اختلافات دورية تحدث في تأثير دوبلر للنجم وتتوافق مع الاختلافات في انبعاث الأشعة السينية.[١٥] وسمحت الحسابات المدارية للباحثين بتقدير كتلة المصاحب «الخفي» الذي كان يسحب الغاز من النجم العملاق. تكهَّن الباحثون بأن ثقبًا أسودَ يمتص الغاز من نجم مصاحب له وأن هذا الغاز يتم تسخينه إلى درجة حرارة عالية بما يكفي لإنتاج أشعة سينية (شكل ١٢).

بينما كان عالم الفلك توم بولتون يستعد لتقديم ورقة بحثية عن هذه النتائج في اجتماع الجمعية الأمريكية الفلكية في بورتوريكو، كان غارقًا في التوتر؛ فلم يكن قد تجاوز الثامنة والعشرين من عمره. يتذكر هو هذا الأمر قائلًا: «قبل خمس دقائق من تقديم بحثي، أخذت أراجعه مراجعة سريعة، كنت جالسًا في جانب الغرفة في محاولة لوضع أحدث البيانات على الرسم البياني الذي رسمته».[١٦] كان يشعر أيضًا بضغوط المنافسة، فلم يكن قد حصل على درجة الدكتوراه إلا منذ عام واحد فقط وكان يعمل بمفرده، وفي الوقت ذاته كان هناك فريق أكثر خبرة من المرصد الملكي في جرينتش، يستخدم تلسكوبا أكبر للحصول على بيانات مماثلة من «نجم الدجاجة إكس-١». لكن الجميع كانوا حذرين في تفسيراتهم، حيث تعثرت مسارات مهنية في السابق بسبب ادعاءات كاذبة باكتشاف ثقب أسود، لكن في غضون عام واحد صار بولتون واثقًا من اكتشافه، وقد راهن بسمعته على ذلك. ثم قدمَّ البحث في معهد الدراسات المتقدمة في برنستون، وهو المقر الأكاديمي الذي عمل فيه أينشتاين وأوبنهايمر. كانت عمليات الرصد التي أجراها قوية ودقيقة، واقتنع بها الجمهور، وهكذا تم العثور على أول «بجعة سوداء».

ومع أواخر سبعينيات القرن العشرين كانت الثقوب السوداء قد تغلغلت في



شكل ١٢: الثقب الأسود النمطي هو أقوى مصدر للأشعة السينية في كوكبة الدجاجة، نجم الدجاجة إكس-١. ويقع هذا الثقب الأسود في مدار ثنائي ضيق مع نجم أزرق عملاق، والغاز الذي يُسحَب نحو الثقب الأسود يشكِّل قرصًا مُزوِّدًا، والذي يسخن بدرجة كبيرة حتى يُصدر أشعة سينية غزيرة.

«ناسا/مرصد شاندرا الفضائي للأشعة السينية، الفنانة/ إم ويس»

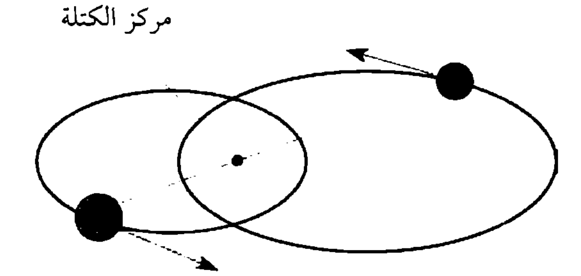
الثقافة الشعبية؛ فقد أذهلت خصائصها الغريبة أناسًا نادرًا ما جال علم الفلك بخاطرهم، وأصدرت شركة ديزني فيلمًا بعنوان «الثقب الأسود»، وحصل موضوعه المشؤوم على تصنيف PG (أي يُنصح بالمشاهدة مع التوجيه الأبوي)، وكان الأول من نوعه بالنسبة لشركة ديزني، ورغم أن الفيلم كان رديئًا تقنيًّا ومبتذلًا في بعض أجزائه، فإنه كان طموحًا بالنسبة لزمانه، كما أنه قدَّم الثقوب السوداء كاستعارة مجازية للموت والتحوُّل. لقد تحولت موسيقى البيتلز البوب الهادئة إلى موسيقى روك صاخبة، ودعمت موسيقى راش وكوين وبينك فلويد الفيزياء الفلكية.[١٧]

وزن شريك الرقص الخفي

تمثل كتلة أي نجم مصيره المحتوم؛ إذ تشير الكتلة إلى حجم خزان الوقود الذي

يختزنه النجم لأجل تفاعلات الاندماج، كما تحدد الكتلة جاذبية النجم، ومن ثم تحدد حجمه ودرجة حرارته الداخلية وضغطه، ونوع عمليات الاندماج التي يمكنه إحداثها، ومدى سرعة حدوث التفاعلات النووية، كل هذا من عدد واحد فحسب؛ ولذلك يجب أن يستند أي ادعاء باكتشاف ثقب أسود إلى تقدير موثوق للكتلة. ولسوء الحظ فإن الكتلة أيضًا هي أصعب ما يمكن قياسه، تعطينا البيانات المرئية درجة السطوع ودرجة حرارة السطح، ولكن هناك حاجة إلى عمليات رصد منفصلة لقياس المسافة وبالتالي درجة اللمعان، ثم ينبغي تطبيق نموذج نجمي من أجل استنتاج الكتلة.

إن الثقب الأسود المنفرد الكامن في الفضاء السحيق يكون ذا كتلة هائلة، ولكنه غير قابل لأن يُكتَشف إذا ما كان وحيدًا؛ لذلك فإنه من حسن الحظ أن أكثر من نصف جميع تلك النجوم يوجد في أنظمة ثنائية أو متعددة. في قانون نيوتن للجاذبية يجذب جسمان أحدهما الآخر بقوة متساوية، فيدوران حول نقطة مشتركة تسمى مركز الكتلة، ودائمًا ما يبقيان على جانبين متقابلين منها. تخيل شخصين يمسك كلٌّ منهما يد الآخر ويدوران، إذا كان لهما الوزن نفسه «سيدوران» حول نقطة في منتصف المسافة بينهما. ولكن إذا قام شخص بالغ بتدوير طفل، فإنهما سيدوران حول نقطة أقرب إلى الشخص البالغ من الطفل، الأمر أكثر شبهًا برمي مطرقة (وآمل أن ينتهي التشابه هنا). ينطبق الأمر نفسه على النجوم؛ النجمان اللذان لهما كتلتان متساويتان سيدوران على مسافة متساوية من مركز الكتلة، وإذا كانت الكتلتان غير متساويتين فإن النجم صاحب الكتلة



شكل ١٣: في النظام النجمي الثنائي، يدور نجمان حول مركز كتلة مشترك، ويكون النجم الأكثر ضخامة أقرب إلى مركز الكتلة والنجم الأقل كتلة أبعد عن مركز الكتلة. وإذا كان النجمان متقاربين للغاية بدرجة تسمح بوجودهما في صورة واحدة، يمكن قياس المدار بواسطة التحليل الطيفي، حيث تتحول الخطوط الطيفية إلى درجات من الأحمر ثم إلى درجات من الأطوال الموجية الزرقاء في دورة تعطي فترة المدار.

«روبرت إتش جودي/جامعة فرجينيا كومنولث»

الأكبر سيدور أقرب إلى مركز الكتلة، في حين أن النجم الأقل كتلة سيدور بتسارع أكبر ويتحرك على نحو أسرع في مدار أكبر (شكل ١٣).[١٨]

تلك هي الفكرة النظرية، دعنا الآن نُضِف إليها الحسابات الرياضية. في المدار الدائري تساوي السرعة المحيط مقسومًا على الوقت المستغرق لإكمال المدار، أو فترة المدار. وإذا ما قِسنا الفترة والسرعة، يمكننا حينها أن نحدد طول نصف قطر المدار، تربط صيغة نيوتن لقانون الحركة الثالث لكبلر الكتلةَ المشتركة لنجمين في مدار بطول المدار وفترة الدوران، وهذه أربعة متغيرات؛ لذا نحتاج إلى قياس ثلاثة منها. ومن ثمَّ فإنه في النظام الثنائي الذي يتضمَّن نجمًا مرئيًّا ومصاحبًا غير مرئي، يجب أن نقيس كتلة النجم المرئي من أجل حساب كتلة الجسم المظلم.[١٩] فما السبيل إلى ذلك؟

أرضية الرقص مظلمة، وعليها ترتدي المرأة ثوبًا أبيض، ويرتدي الرجل حُلَّة سوداء. من الجانب تأتي إضاءة خافتة، المرأة مرئية للعيان، لكن يكون الرجل غير مرئي. إنهما يدوران فوق الأرضية، ومن خلال طريقة تحرك المرأة ندرك أنها ممسوكة بيد رفيق غير مرئي. وكذلك النجوم الثنائية في حالة ارتباط قوية وانعزال عن الكون الأكبر، لو كان النجمان منفصلين بمسافة كبيرة وليسا بعيدين عن الأرض كثيرًا، يمكننا حينها رؤية كلا النجمين ومراقبة حركتهما لقياس المدار. حينها يكونان ثنائيًّا مرئيًّا، ولكن في أغلب الأحيان يكون النجمان بعيدين ولا يستطيع علماء الفلك رؤيتهما كجسمين منفصلين، ولكن التحليل الطيفي يكشف عن خطوط الامتصاص الخارجة من كل نجم، والتي تتذبذب إلى أطوال موجية أطول وأقصر، وهو ما يمثل إزاحة دوبلر دورية تسببها الحركة المدارية، وهذا هو الثنائي الطيفي. أما في حالة الثنائي الذي يكون فيه أحد النجمين ثقبًا أسودَ، تُغلُّ إحدى يدينا خلف ظهورنا لأن الطيف لا يُظهِر إلا خطوطَ الامتصاص الخارجة من النجم المرئي.

وكما هو الحال مع الراقصين، تشير حركة النجم المرئي إلى حركة النجم غير المرئي، ولكن الأمر ينطوي على تعقيدات كبيرة، أولها أننا بحاجة إلى تقدير كتلة النجم المرئي، وللقيام بذلك نحتاج إلى تحديد مسافة بُعد النظام الثنائي من أجل حساب درجة اللمعان، أو عدد الفوتونات المنبعثة من النجم في كل ثانية. ثم يتم إدخال هذه الكميات جنبًا إلى جنب مع درجة حرارة سطح النجم (والتي تُحدَّد من لونه) وجاذبية سطحه (التي تُحدَّد من شكل الخطوط في الطيف)، إلى نموذج متطور للبنية النجمية وإنتاج الطاقة لحساب كتلته التقريبية.

ثانيًا، هناك مشكلة المنظور؛ إذ يقيس التحليل الطيفي إزاحة دوبلر، أو الحركة القطرية سواء كانت في اتجاه الراصد أو عكس اتجاهه، والنظام الثنائي الذي يُنظر إليه من عند حافته - حيث يكون المدار متعامدًا مع مستوى السماء — يردُّ إلينا التأثير كاملًا، حيث إنه في كل مدار يحدث مرة واحدة أن يقترب أحد النجمين نحونا مباشرة، ويبتعد النجم الآخر عنَّا مباشرة. ولكن إذا تم النظر إلى النظام الثنائي وجهًا إلى وجه - حيث يكون المدار في مستوى السماء — فلن يتأتى لنا قياس تأثير دوبلر؛ لأن كل الحركة ستكون حينها جانبية من الطرفين. تتوزع النُّظُم الثنائية في اتجاهات عشوائية في الفضاء؛ لذلك نواجه تعقيدًا إضافيًا يتمثل في أننا لا نعرف زاوية الميل، لكن الخبر السارّ هنا هو أنه بالنسبة لجميع زوايا الميل تقريبًا، تُقلل إزاحة دوبلر من السرعة المدارية، نظرًا لأن جزءًا من الحركة عادة ما لا يكون قطريًّا. لذا عندما يحسب علماء الفلك كتلة نجم، فإنهم عمومًا لا يستطيعون إلا تحديد الحد الأدنى لكتلته، وبما أن الهدف هو إثبات أن المصاحب غير المرئي يمتلك الحد الأدنى من الكتلة اللازمة ليكون ثقبًا أسود، فهي إذًا طريقة ناجحة.[٢٠]

ثقوب سوداء بأوراق اعتماد من ذهب

عندما يفكر الناس في علم الفلك، تتبادر إلى أذهانهم فورًا تلك الصور الرائعة التي التقطها تلسكوب هابل الفضائي، ولكن العديد من تطورات فهم الكون قد أتت من التحليل الطيفي، وهي تقنية تشتيت الضوء إلى ألوانه المكوِّنَة له، وقد استخدم نيوتن طيفًا من أجل فهم طبيعة الضوء. وفي أوائل القرن التاسع عشر، بعد أن عانى الشاب جوزيف فون فراونهوفر بؤسَ الحياة في دار الأيتام، وقسوة كافله المتوحش، ونجا من انفجار وقع في مصنع الزجاج حيث كان يعمل، تمكن من وضع أول طيف لأشعة الشمس وشهد السمات التي ألمحت إلى تكوينها، وبعد مرور مائة عام قامت مجموعة من نساء يتقاضين رواتبَ زهيدة من عملهن في مرصد جامعة هارفارد بمسح مئات الآلاف من الأطياف المُسجَّلة على لوحات الصور الفوتوغرافية، وجمع المعلومات التي استُخدِمَت لفهم مادة صنع النجوم والحجم الحقيقي للكون.[٢١]

لقد درستُ بنفسي آلاف الأطياف طوال حياتي كعالم فلك، فوجدت كل واحد منها أشبه بلغز يحتاج الحل، أو هدية يجب أن تُفتح. فهي السبيل لقياس المسافة

والتركيب الكيميائي، وتقدم أدلة على عنف هائل كامن في مراكز المجرَّات. كانت تلك الخربشات التي تظهر على الشاشة في نهاية ليلة الرصد نتيجة الضوء الذي يصل إلى التلسكوب، الذي يتحول إلى خطوط دقيقة بواسطة جهاز الطيف، ويسقط على جهاز اقتران الشحنات السليكوني، أو الأداة ذات الشحنة المزدوجة (CCD)، ويُحوِّل هذا الجهاز الفوتونات إلى إلكترونات ثم إلى إشارة كهربائية تتم معالجتها في خريطة تتضمن الشدة مقابل الطول الموجي.

ذات ليلة بينما كنت أعمل في هاواي، كنت أُجرى بعض عمليات الرصد باستخدام التلسكوب على قمة بركان مونا كيا الذي يبلغ ارتفاعه ١٤ ألف قدم، فتجمَّعت البيانات من جهاز اقتران الشحنات على شكل خطوط أفقية على شاشة الكمبيوتر. لفت نظري خط رفيع خافت، كانت الخطوط الداكنة في الطيف الرقمي تدل على وجود مجرَّة بعيدة تتكون من عناصر مجرَّة درب التبانة نفسها، واستطعت استنتاج نظام دورانها ونوع النجوم التي تشكلها وكمية الغاز المختلطة بين نجومها. من الانزياح الثقالي نحو الأحمر في السمات الطيفية عرفت أن تلك المجرَّة كانت على بُعد عشرة مليارات سنة ضوئية، وأن الضوء كان يسافر منها منذ زمن يسبق تشكُّل الأرض بفترة طويلة. وعرفتُ أن هذه المجرَّة الخافتة كانت تبتعد عن درب التبانة بسرعة أكبر من سرعة الضوء وقت أن انبعث منها هذا الضوء، وذلك بفضل التمدُّد السريع للغاية الذي حدث للكون بعد وقت قصير من الانفجار العظيم. والكون تحكمه النسبية العامة لا النسبية الخاصة؛ لذلك يمكن أن يتوسع الفضاء بسرعة أكبر من سرعة الضوء! وإنني لأشعر بالخجل من الاعتراف بأنني في ذلك الوقت نسيت أن أتعجب من قدرتي على معرفة أشياء كهذه حول الكون. ونادرًا ما تفكرت في التسلسل المنطقي للأفكار وأسس المنهج العلمي الذي يدعم ما أعرفه.

إن التحليل الطيفي هو المفتاح لفهم النُظُم النجمية الثنائية ومداراتها؛ فهو يتيح لعلماء الفلك قياس كتلة المصاحب غير المرئي في النظام الثنائي، كما يسمح بقياس الكتلة غير المرئية بدقة كافية لاستنتاج أن وحوش أينشتاين حقيقية. يوجد عدد بسيط من تلك الحالات «الذهبية» لنُظُم ثنائية يكون فيها للمصاحب غير المرئي كتلة كافية تسمح له أن يكون ثقبًا أسودَ، ومن الصعب للغاية تفسير هذا المصاحب غير المرئي باستخدام أي فرضية أخرى. دعنا نلقِ نظرة فاحصة على النموذج الأصلي، نجم الدجاجة إكس-١.

من الأرض نرنو نحو كوكبة الدجاجة التي تقبع بسكون في السماء الصيفية، ثم نركز على منطقة ما بالقرب من مركز الصليب الذي يميز جسم البجعة، وباستخدام مناظير جيدة يمكننا أن نرى نجمًا أزرق فاتح اللون، محاطًا بمجموعة كبيرة من النجوم الصغيرة الساخنة التي تشكلت جميعها في الوقت نفسه، فمنذ خمسة ملايين عام عندما انفصل أسلافنا من الرئيسيات ليكونوا فرعًا آخر من فروع من شجرة التطور، نشأت هذه النجوم من سحابة منضغطة من الغاز والغبار. أما النجم الأزرق فاتح اللون الذي يعنينا في هذا المقام، فيقع على بُعد ٦٠٠٠ سنة ضوئية، بالقرب من حافة الذراع الحلزونية المجاورة في درب التبانة. وهذه المسافة الهائلة تبلغ ٢٠ ألف تريليون ميل. ولكي تتأتى رؤية هذا النجم بسهولة، لا بد أن يكون ساطعًا للغاية، بحيث يصدر ٤٠٠ ألف ضعف للطاقة الصادرة من الشمس، وهذا الضوء قديم؛ فقد غادر النجم وقت أن كان قاطنو الكوكب يقلُّون عن المليون نسمة وكانت حيوانات الماموث على وشك الانقراض في أمريكا الشمالية.

نقترب من فريستنا بحذر؛ لأنه على بعد مسافة تساوي المسافة بين الأرض والشمس، سيكون النجم ساطعًا للغاية، حيث يساوي حجمه ٢٠ ضعفًا لحجم الشمس؛ كما لو كان يحيط الشمس بذراعين مفرودتين على آخرهما. ويرتبط هذا النجم العملاق الأزرق بمدار يمتد في رحلة تستمر لستة أيام مع رفيق شبه خفي أقرب إليه من قرب عطارد إلى الشمس. لكن هذا الرفيق ليس مظلمًا بالكلية، فهذا العملاق الأزرق هو مفاعل اندماجي قوي يقوم بدفع رياح مُحمَّلة بالبلازما من غلافه الجوي الخارجي إلى الفضاء. وتُسحب بعض هذه المادة بواسطة الرفيق لتشكيل قرص دوَّار من غاز شديد السخونة. وعند درجة حرارة تزيد عن المليون درجة، يصدر قرص الغاز فيضًا من الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية. كما تشوِّش جاذبية هذا الرفيق أيضًا الغلاف الخارجي للعملاق الفائق إلى شكل قطرة تشير نهايتها الضيقة إلى ذلك الرفيق المصاحب. لو كان بوسعنا أن نتبع اتجاه إشارة القطرة ونقترب من القرص الدوار الذي يميز الرفيق، سنرى نقطة صغيرة من الظلام المطلق في مركزه: الثقب الأسود (شكل ١٤).

لكن هذا الوصف هو مجرد استنتاج؛ فحتى الآن لم نشاهد هذا الثقب الأسود أو غيره عن قرب، ومع ذلك، فقد كُتبت أكثر من ١٠٠ ورقة بحثية حول الدجاجة إكس-١؛ فهو واحد من أكثر الأجرام السماوية التي خضعت للدراسة على نحو مكثف. قيست هذه الفترة المدارية بدقة شديدة، فوجدت ٥٫٥٩٩٨٢٩ يومًا لكن تبيَّن وجود خطأ يبلغ عُشر ثانية.[٢٢] نحتاج إلى معرفة كتلة العملاق الضخم وميل المدار لحساب كتلة رفيقه.



شكل ١٤: لا يمكن الكشف عن الثقب الأسود منفردًا إذا كان منعزلًا بالكلية، أما في النظام الثنائي المحتوي على نجم ضخم، يسحب الثقب الأسود كتلة من رفيقه المصاحب نحو قرص مزوِّد، ويتم رفع درجة حرارة هذا الغاز بدرجة تكفي لانبعاث الأشعة السينية. ويدور القرص المزوِّد حول أفق الحدث للثقب الأسود الدوار.

«ناسا/مختبر الدفع النفاث - معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا»

ويُظهِر التحليل الطيفي والنمذجة التفصيلية أن كتلة «إتش دي إي ٢٢٦٨٦٨» تساوي نحو ٤٠ ضعفًا لكتلة الشمس.[٢٣] ويعد قياس الميل أكثر صعوبة؛ لأن الرفيق المظلم لا يتحرك إلى المنطقة الواقعة خلف النجم المرئي، بمعنى آخر لا يُظهِر هذا النظام أيَّ كسوف. وتشير الدراسات الحديثة إلى ميل قدره ٢٧ درجة، ممَّا يعني أن كتلة الرفيق المظلم تساوي ١٥ ضعفًا لكتلة الشمس.[٢٤] وهذا يتخطى كثيرًا الكتلة اللازمة لبقايا النجم لتتحول إلى نجم نيوتروني، كما أن جاذبيتها قوية لدرجة توجب أن يكون الرفيق المدمج ثقبًا أسود. ولا تزعزع جميع جوانب الشك في البيانات وجميع جوانب الشك في النمذجة هذا الاستنتاج.[٢٥] وبحلول عام ١٩٩٠ كانت الأدلة قوية لدرجة جعلت ستيفن هوكينج يدلف إلى مكتب كيب ثورن في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، ويوقِّع على شهادة علَّقها على الحائط، مُعلنًا فيها خسارة رهانه.

إن النجوم التي هي بالضخامة الكافية لأن تموت كثقوب سوداء نادرة للغاية، تحتوي مجرَّة درب التبانة على حوالي ٤٠٠ مليار نجم، معظمها أقزام حمراء قاتمة أقل حجمًا بكثير من الشمس. ويمكننا استخدام عيِّنة صغيرة من الثقوب السوداء المؤكَّدَة هويتها الموجودة بجوار الشمس، لتقدير إجمالي عددها في المجرَّة بأكملها، والذي يشير إلى نحو ٣٠٠ مليون ثقب أسود، والأمثلة القليلة ذات أوراق الاعتماد الذهبية تمثل جزءًا صغيرًا متناهي الصغر من إجمالي نجوم المجرَّة، والذي بدوره يمثل جزءًا بسيطًا من إجمالي نجوم الكون.

خلال العقد الماضي أو ما نحوه، نشر الخبراء قوائم تضم من ٢٥ إلى ٣٠ نجمًا مُرشحًا ليكون ثقبًا أسود مؤكدًا[٢٦]، وهذا العدد آخذ في الزيادة ببطء؛ نظرًا لتشدد المعايير المفروضة على الأدلة، وجميعها يوجد في أنظمة ثنائية ذات مدارات مُقاسة بدقة، حيث يمتلك المصاحب المظلم كتلة أكبر من كتلة الشمس بثلاثة أضعاف، وبالتالي لا بد أن يكون هذا ثقبًا أسود. وفي كل حالة توجد مجموعات إضافية من الأدلة التي تدعم هذه الفرضية. تتراوح كتلة هذه الثقوب السوداء ما بين ٦ و٢٠ ضعفًا لكتلة الشمس، بينما تتراوح فتراتها المدارية من الدوران البطيء الذي يستغرق شهرًا إلى الدوران السريع الذي يستغرق أربع ساعات. واكتُشف ثقبان أسودان في المجرَّة الجارة الأقرب إلى درب التبانة، وتسمى مجرَّة سحابة ماجلان الكبرى وأطلق على هذين الثقبين الأسودين إل إم سي إكس-١ (LMC X-1) وإل إم سي إكس-٣ (LMC X-3)، وكلاهما يقع على مسافة ١٦٥ ألف سنة ضوئية. أما الثقوب السوداء الأخرى فيتراوح بُعدُها عن الأرض ما بين ٤٠٠٠ و٤٠ ألف سنة ضوئية، ويوجد ٣٠ نظامًا آخر ينتظر بيانات أكثر أو أفضل للانضمام إلى قائمة الثقوب السوداء المؤكدة.

استخدام عدسات الجاذبية

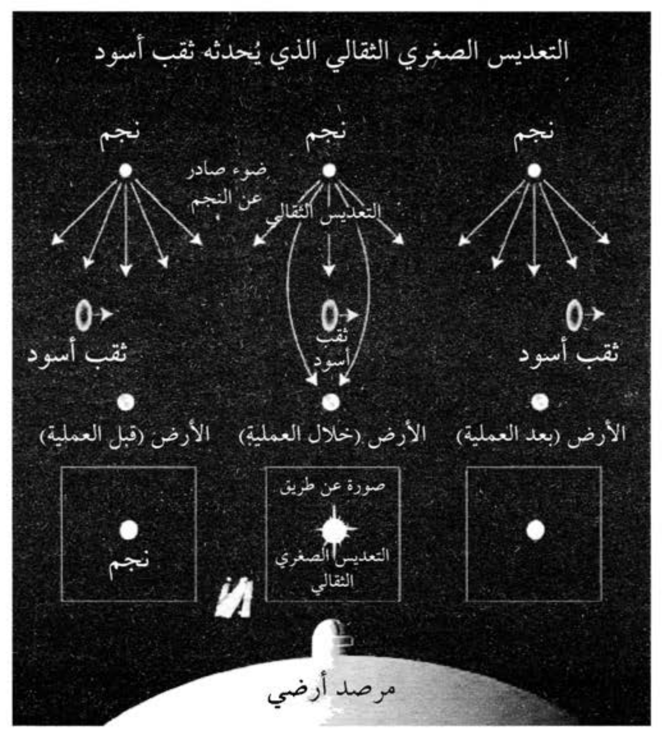
حتى الآن نرى في قصتنا هذه أن البحث عن الثقوب السوداء اعتمد على أنظمة النجوم الثنائية، حيث يكون الثقب الأسود شريك رقص غير مرئي، ومع ذلك توجد طريقة واحدة يمكن أن تجد بها الراقص المظلم حتى لو كان وحيدًا. وتعتمد هذه الطريقة على نبوءة أساسية تنصُّ عليها النسبية العامة، ألا وهي أن أي كتلة من أي نوع تسبب انحرافًا للضوء. وبما أن الكتلة تحني الضوء، فيمكن لنجم أو مجرَّة أن تركز وتضخم الضوء القادم من مصدر بعيد. تسمى هذه الظاهرة «المفعول العدسي

التثاقلي»، وقد تم التنبؤ بها بعد أن نشر أينشتاين نظريته بفترة وجيزة، لكنها لم تُرصَد فعليًّا إلا عام ١٩٧٩، عند مشاهدة صورتين لنجم زائف (كوازار) واحد، إذ كان سبب انقسامه تداخله ومجموعة متلاصقة من المجرَّات.

إن المفعول العدسي التثاقلي هو تأثير ضعيف، فالنجم المفرد ليس كبيرًا بما يكفي كي يحني الضوء بقدر كبير. وفي عام ١٩١٩ قاس إدنجتون انحراف الضوء الصادر عن نجم بعيد يمر بجوار حافة الشمس عند ثانيتين قوسيتين، أي واحد على ألف من قطر زاوية الشمس، والمفعول العدسي التثاقلي هو أيضًا أمر نادر الحدوث؛ فالمسافة بين النجوم كبيرة، ومن غير المحتمل أن يصطفَّ أي نجمين على نحو دقيق بما يكفي لرصد هذا التأثير، فاحتمالات مثل هذه الاصطفاف تبلغ واحدًا في المليون؛ لذا قد يتعين رصد مليون نجم لاكتشاف حدث واحد. عندما يمر نجم قريب مباشرة أمام نجم أبعد، يسمى هذا «التعديس الصغري الثقالي»، وفي هذا التأثير تكون زاوية الانحراف صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن رؤية انقسام الصورة، ولكن يحدث تضخيم ثقالي لضوء النجم الخلفي، فيرى الراصد نجم الخلفية يتوهج بشكل مؤقت عندما يعبر نجم المقدمة أمامه. وكلما كان النجم الأمامي أثقل، طالت مدة التأثير. وبما أن عملية التعديس تعتمد على الكتلة وليس الضوء، يحدث التوهج المؤقت حتى عندما لا يكون النجم الأمامي أو العدسة مصدرًا لأي ضوء (شكل ١٥). وهذه هي الطريقة الوحيدة للكشف عن ثقب أسود منعزل.[٢٧]

إحدى مميزات التعديس الصغري الثقالي هي بساطته ومباشرته، ففي أي نظام نجمي ثنائي هناك كتلتان ينبغي قياسهما، وميل مداري غير معروف في الغالب، ومتغيرات تُستَمَد بشكل غير مباشر من التحليل الطيفي. ولكن تنطوي طريقة التعديس على معادلة واحدة تربط التضخيم بالكتلة وبُعد العدسة. وبالنسبة لكتل الثقوب السوداء النمطية، يستمر التضخيم لمئات الأيام؛ لذلك يسهلُ رصده. أما الجانب السلبي لهذه الظاهرة فيتمثل في أن التضخيم هو حدث يحدث لمرة واحدة، على عكس الدوران المتكرر الذي ينطوي عليه النظام الثنائي، والذي يسمح بجمع المزيد من البيانات في المستقبل.

عندما يمر الثقب الأسود أمام نجم أبعد، يشبه الأمر سفينتين تمر إحداهما بالأخرى ليلًا؛ ولهذا لا تتكرر الإشارة أبدًا. والأهم من ذلك أن المسافة والكتلة مرتبطتان بمعادلة التعديس؛ لذا ما لم تتوافر معلومات إضافية لتحديد المسافة، حينها لن يتأتى لنا التيقُّن من الكتلة.



شكل ١٥: يمكن الكشف عن الثقوب السوداء المنعزلة من خلال الحقيقة القاضية بأن الكتلة تحني الضوء. إذا مر ثقب أسود مباشرة أمام نجم أبعد منه، فإن الثقب الأسود يعمل عمل العدسة فيحدث تضخيم لضوء النجم لفترة وجيزة. ويكون انقسام الصورة صغيرًا جدًّا بحيث لا يمكن رؤيته بواسطة أي تلسكوب.

«ناسا/وكالة الفضاء الأوروبية»

إن اكتشاف الثقوب السوداء عن طريق التعديس الصغري الثقالي يشبه البحث عن إبرة في كومة قش. ولقد طُوِّرت عمليات المسح بطريقة التعديس الصغري الثقالي للبحث عن الأجرام الهالية المتراصة الضخمة (MACHOs) التي قد تفسر «المادة المظلمة» وهي التي تفوق المادة الطبيعية في مجرتنا وزنًا بعامل يساوي ٦. يمكن أن تكون الأجرام الهالية المتراصة الضخمة تتمثل في أي نوع من الأجرام المظلمة أو القاتمة جدًّا، مثل الثقوب السوداء، أو النجوم النيوترونية، أو الأقزام البنية (الأجرام دون النجمية)، أو الكواكب الحرة الطافية. لم تنجح عملية التعديس الصغري الثقالي في الكشف عن الأجرام الهالية المتراصة الضخمة، ولكن هذه المسوحات نفسها التي قُصِدَ منها الكشف عن المادة المظلمة، نجحت في اكتشاف (بضعة) ثقوب سوداء.[٢٨]

سيخضع واحد من كل مليون نجم لعملية التعديس الصغري الثقالي، لكن ١٪ فقط من هذه النجوم سيخضع لهذه العملية بواسطة ثقب أسود؛ لذلك يجب مراقبة مئات ملايين النجوم للعثور على ثقبين أسودين. استخدمت مجموعة بحثية بولندية بيانات مُجمَّعة على مدار عِقد من الزمن عن طريق تلسكوب ذي قطر يبلغ ١٫٣ متر بهدف تحديد ثلاثة أجرام مُرشَّحة لتكون ثقبًا أسود من بين مليارات القياسات الضوئية لـ ١٥٠ مليون نجم.[٢٩] وهذا ما يُقال عنه إنه تفانٍ في العمل!

الفيزياء على حافة الدوامة

في قصة قصيرة بعنوان «الانزلاق إلى الدوامة» كتبها القاصُّ إدجار ألان بو عام ١٨٤١، كان الراوي شابًّا تحول إلى عجوز فجأة حين واجه خطر الموت بعد أن كاد يسقط في دوامة تقع قُبالة سواحل النرويج، وفي تلك الحادثة مات أحد أخويه في الهاوية، بينما أصيب الآخر بالجنون من هول المشهد. ولم ينجُ سوى الراوي وحده ليقصَّ هذه الحكاية.[٣٠] كان جسد الراوي الخيالي يرتعش بينما يتذكر المشهد ويقول: «كانت حافة الدوامة أشبه بحزام عريض من رذاذ لامع، ولكن لم ينزلق أي جزيء من هذا الرذاذ إلى فم القمع المرعب، والذي كان داخله - بقدر ما يمكن للعين أن تدركه - جدار مائي أسود ناعم لامع ...».

وجد ذلك الراوي الذي اختلقه بو في الدوامة جمالًا غريبًا مرعبًا، ذلك الشعور ذاته قد نحسُّه تجاه الثقوب السوداء، إن وحوش أينشتاين مرعبة لكنها مثيرة للاهتمام. فكما يتناثر الرذاذ اللامع وبقايا السفن وطرح البحر على حافة الدوامة، يُنثَر الثقب الأسود في النظام الثنائي ويُحدِث تأثيرات مذهلة. فمن المفارقات الرائعة في علم الفلك أن الأجرام التي تكون في الواقع غير مرئية بالكلية، يمكن أن تكون الأجرام الأكثر سطوعًا في الكون، والسبب في ذلك هو الجاذبية.

كمثال أرضي، تأمل معي سد إيتايبو المنشأ على الحدود بين البرازيل وباراجواي، يولِّد هذا السد كمية هائلة من الطاقة تُقدَّر بـ ١٠٠ تيراواط لكل ساعة في السنة، وهو ما يكفي لتلبية احتياجات الطاقة لعدة مئات من ملايين البشر.[٣١] من أين تأتي هذه الطاقة؟ يكون السد خلفه مسطحًا مائيًّا مرتفعًا من مياه نهر بارانا. وفي كل ثانية يسقط ٣٠٠ ألف متر مكعب من الماء من ارتفاع ١١٠ أمتار، ممَّا يحوِّل طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة

حركيَّة، بينما يتسارع الماء إلى ١٠٠ ميل في الساعة. وتتباطأ سرعة الماء إلى ١٠ أميال في الساعة عند قاع السد، حيث تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة دورانية من خلال ريشات مراوح التوربينات، ثم يولِّد التوربين الدوَّار الكهرباء. وبالمثل عندما تسقط المادة في الثقب الأسود تتولَّد الطاقة.

دعنا ننظر إلى ما يحدث عندما تقع المادة في الثقب الأسود، تسمى هذه العملية «التنامي»، تجذب الثقوب السوداء في الغالب غاز الهيدروجين الذي يشكِّل النجوم ويملأ الفضاء الفارغ بينها بكثافة منخفضة. يمكن أن تسقط هذه البروتونات والإلكترونات مباشرة، حيث يمكن أن تسقط نحو أفق الحدث، وتختفي في الثقب الأسود، ولا تُرى مرة أخرى، لكن مع ذلك هذا مستبعد للغاية؛ لأن القليل من جزيئات الغاز سيتجه مباشرة نحو الثقب الأسود، وسيتحرك معظمهما بشكل جانبي. وبسبب هذه الحركة الجانبية، قد تتجه الجزيئات إلى الفضاء ولا تعود أبدًا، أو قد تبدأ في الدوران حول الثقب الأسود. كما سيصطدم بعضها ببعض، وذلك لتقارب مساراتها. ومن ثمَّ فإن الجزيئات تسلك طريقًا فوضويًّا غير مباشر نحو الثقب الأسود، وبسبب كل هذه التصادمات ترتفع حرارة الغاز.

والآن نضيف تلك الحقيقة المهمة التي تفيد بأن الثقب الأسود يدور، وهو الأمر الذي يكسبه زخمًا زاويًّا، وفي الفيزياء لا يضيع الزخم الزاوي أبدًا، وهناك قاعدة تحكم كيفية تحرُّك الجسيمات في النظام الدوار.[٣٢] إذ يدور الثقب الأسود بسرعة لأنه انضغط فصار أصغر حجمًا، أما النجم هائل الحجم الذي يدور ببطء سوف يتشظى ويتحول إلى بقايا نجمية سريعة الدوران (تخيل متزلجًا يدور ببطء فاردًا ذراعيه، ثم تزداد سرعته عندما يثني ذراعيه إلى جسده مما يجعله أقل حجمًا). يجعل الثقب الأسود الدوار الغاز الساخن يدور حوله، تمامًا كما يدور الماء بالقرب من مصرف حوض الاستحمام إذا ما حركت الماء بقوة في المركز، ويكون دوران الغاز أقوى عند خط استواء الثقب الأسود، وتسمى هذه الدوامة من الغاز الساخن «القرص المزوِّد».

وبما أن معظم الغاز يتركز في قرص مزوِّد حول خط استواء الثقب الأسود، فإن المناطق الواقعة فوق قطبي الثقب الأسود تكون فارغة نسبيًا، وهذا يعني أن بعض الغاز الساخن يمكنه الهروب عبر القطبين. وبينما يفعل ذلك فإنه يحول طاقة الدوران من الثقب الأسود إلى طاقة حركية. ينبعث هذا الغاز في صورة نفاثات راديوية من الجسيمات سريعة الحركة بمحاذاة محور دوران الثقب الأسود، وتحمل تلك النفاثات



شكل ١٦: صورة من محاكاة حاسوبية لثقب أسود والقرص المزوِّد الذي يحيطه، باستخدام المعادلات الكاملة للنسبية العامة. الجانب الأيسر الأكثر سطوعًا من القرص يقترب، والجانب الأيمن الأكثر قتامة من القرص يبتعد. وتحدث التشوُّهات لأن الكتلة تسبب انحناء الضوء. لاحظ أن الجانب البعيد من القرص لا يختفي بسبب الثقب الأسود لأن التعديس الثقالي يسمح لنا برؤية ما خلف الثقب الأسود.

«جيه إيه مارك/المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي»

جزءًا صغيرًا من طاقة الجاذبية للمادة التي تسقط فيها، لو تمكنَّا من الاقتراب من القرص المزوِّد، سنشهد تشوُّهات غريبة بسبب انحناء الضوء بفعل جاذبية الثقب الأسود الشديدة (شكل ١٦).

يمكننا تصوُّر القرص الدوامي للغاز، تمامًا مثل البقايا وطرح البحر الساخن الذي كان على حافة دوامة بو. مركز هذا الحدث هو ثقب أسود يدور، قرص مظلم لا يهدأ. وكلما اقتربت الجزيئات من الثقب الأسود، تحركت على نحو أسرع؛ حيث تتحول طاقة جاذبيتها إلى طاقة حركية، كما أنها تتصادم، ومن ثَمَّ ترتفع درجة حرارة الغاز، ويؤدي الاحتكاك داخل القرص إلى انبعاث إشعاع حراري مكثف. تصل درجة حرارة الغاز في القرص المزوِّد إلى ملايين الدرجات وهو يضيء بشكل ساطع في صور الأشعة السينية.

هكذا تتحول قوة الجاذبية إلى إشعاع. ثمة مفارقة في حقيقة أن شيئًا ما بهذا السواد الحالك يمكن أن يخلق مشهدًا ساطعًا مشرقًا بهذه الدرجة، وهذه العملية فعَّالة

للغاية، حيث تشير الفاعلية في هذا السياق إلى الجزء البسيط من الطاقة المخزَّنة الذي يتحول إلى إشعاع. إن احتراق المواد الكيميائية - الذي يعد مصدر معظم طاقاتنا على الأرض - تبلغ فاعليته ٠,٠٠٠٠٠٠١٪. وعمليات الاندماج النجمي - العملية التي تجعل النجوم مشرقة -تبلغ فاعليتها أقل بقليل من ١٪. أما عملية التزوُّد في الثقب الأسود الثابت تبلغ فاعليتها ١٠٪، وترتفع الفاعلية إلى ٤٠٪ للثقب الأسود الدوَّار.[٣٣] ومن هنا تعد الثقوب السوداء أقوى مصادر الطاقة في الطبيعة.

لا يسقط الغاز بسهولة في الثقب الأسود لأنه يتمتع بزخم زاويٍّ، وينطبق الشيء نفسه على الكواكب التي تدور حول الشمس. كانت دراسة تفاصيل عملية تنامي الثقوب السوداء واحدة من أكثر المشاكل تحديًا في الفيزياء الفلكية؛ فقد استغرق الأمر من عشرات الباحثين ما يقرب من عقدين من الزمن لحلها.[٣٤] تتعرض جزئيات الغاز للاحتكاك في القرص، وبالتالي فإن القرص بأكمله يعمل كما لو كان قطعة واحدة لزجة. ونتيجة لذلك تفقد بعض الجزئيات الزخم الزاوي وتقترب من الثقب الأسود، بينما تكتسب بعض الجزيئات زخمًا زاويًّا وتتحرك بعيدًا عنه. وتتحرك الجزيئات التي تقترب من الحافة الداخلية للقرص ضمن هامش ضئيل من سرعة الضوء. وبينما يقترب الجزيء العادي من أفق الحدث، يجد نفسه يتحرك حركة حلزونية بطيئة داخل القرص المزوِّد، متصادمًا مع جميع الجزيئات الأخرى. ثم تسحبه الجاذبية مباشرة إلى الثقب الأسود من عند الحافة الداخلية للقرص المزوِّد، وهكذا يجمع الثقب الأسود الكتلة من خلال هذا التسلسل من الأحداث.

قام السير آرثر إدنجتون بحساب الحد الأقصى لعملية التنامي في أوائل القرن العشرين، يفترض حد إدنجتون كروية الجرم السماوي ويطلب تحديد عند أي نقطة تضاهي قوة الجاذبية التي تسحب جسيمًا للداخل ضغط الإشعاع الذي يدفع الجسيم إلى الخارج. إن المعدل الأقصى الذي يمكن أن تضاف فيه الكتلة إلى الثقب الأسود منخفض للغاية، فلا يمكن أن ينمو خلال سنة واحدة بنسبة تزيد عن ثلث كتلة القمر. وبهذا المعدل سوف تستغرق مضاعفة كتلته ٣٠ مليون سنة. ولكن التحويل الفعَّال للكتلة التي تسقط إلى إشعاع منبعث سيجعل الثقب الأسود شديد السطوع، ويمكن أن يكون الثقب الأسود الذي يتغذى على الغاز المنبعث من مصاحبه أكثر سطوعًا ١٠٠ مرة من نجم آخر له الكتلة نفسها.

جولة بين الأنظمة ثنائية النجم

إن النجوم التي تُنهي حياتها كنجوم نيوترونية تمثل نسبة قليلة من إجمالي عدد النجوم، وتلك التي تُنهي حياتها كثقوب سوداء تمثل نسبة أقل تبلغ بضعة أجزاء من الواحد بالمائة، والثقوب السوداء نادرة كالبجع الأسود. وأكرر ... يميل توزيع كتل النجوم أثناء تكونها بدرجة كبيرة نحو النجوم المنخفضة الكتلة، وهناك مئات من الأقزام الحمراء منخفضة الكتلة مقابل كل نجم شبيه بالشمس. وتموت الأقزام الحمراء على شكل جمر خافت يُدعى الأقزام البيضاء. ولذلك، فإن أكثر من ٩٥٪ من جميع النجوم ستُنهي حياتها كأقزام بيضاء وليس كنجوم نيوترونية أو ثقوب سوداء.

ما يزيد عن نصف إجمالي عدد النجوم بقليل هي نجوم منفردة، كما هو حال شمسنا، بينما يوجد ثلثها في أنظمة ثنائية، و١٠٪ منها يوجد في أنظمة ثلاثية أو أكثر.[٣٥] وتدور معظم النجوم التي توجد في أنظمة ثنائية في مدارات تفصل بينها فترات تصل إلى سنين أو عقود أو حتى قرون؛ لذلك لا تتفاعل وتؤثر على تطور أحدها الآخر. لكن ثمة نسبة قليلة من الثنائيات - أقل من ٥٪ من الإجمالي - لها فترات مدارية تتراوح بين عدة ساعات وعدة أسابيع.

يمتلك أي نجم حدودًا وهمية داخلها تكون كل المواد مشدودة إليه بواسطة الجاذبية، وفي النجوم المعزولة تتخذ هذه الحدود شكل الكرة، وعندما يكون النجمان الثنائيان قريبين من بعضهما، تتمدَّد هذه الحدود إلى شكل الدمعة مع وجود نقطة تلامس. ويمكن أن تتدفق الكتلة من نجم إلى آخر عبر نقطة تلامس الدمعتين، وعادة ما يسحب النجم الأعلى كتلة الغاز من النجم الأقل كتلة، وإذا كانا قريبين للغاية تندمج الأسطح الوهمية في صورة غلاف مشترك ويمكن أن تتحرك الكتلة بسهولة بين النجمين.[٣٦]

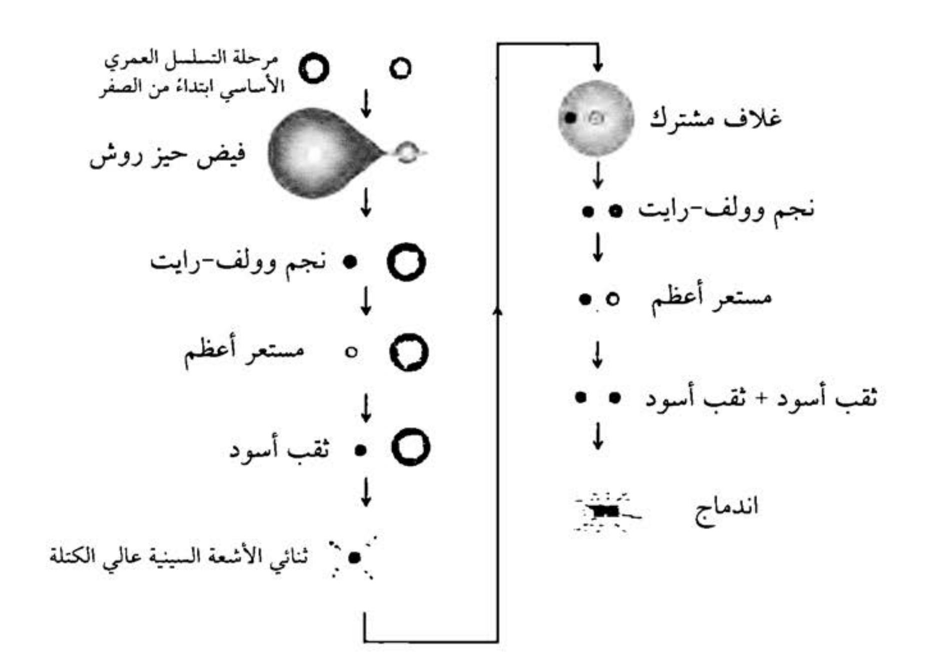
ولأن معظم النجوم أقزام فإن معظم الثنائيات القريبة من بعضها ستحتوي على اثنين من الأقزام الحمراء، وعندما تموت هذه النجوم فإنها تنضغط لتستحيل أقزامًا بيضاء، ولكن النجوم منخفضة الكتلة تعيش لفترة طويلة لدرجة أن معظمها لم يمت بعد، أما النجوم عالية الكتلة فلها فترة حياة قصيرة؛ لذلك إذا حددنا ثنائيًّا يتضمن نجمًا عالي الكتلة ونجمًا منخفض الكتلة، فمن المحتمل أن يكون النجم الأكثر ضخامة قد مات وخلَّف وراءه نجمًا نيوترونيًّا أو ثقبًا أسود.

وهذه هي أنواع ثنائيات البقايا النجمية بترتيب النُّدرة المتزايدة: زوج من الأقزام البيضاء، قزم أبيض ونجم نيوتروني، قزم أبيض وثقب أسود، زوج من النجوم النيوترونية، نجم نيوتروني وثقب أسود، زوج من الثقوب السوداء. دعنا نُسمِّ هذا النوع الأخير «زوج اللؤلؤتين السوداوين»، فهذا أندر الأنواع، وسنعود إليه لاحقًا.

إن رواية كل قصص النجوم الثنائية تحتاج كتابًا أطول بكثير من هذا الكتاب، فكما هي العلاقات بين البشر، فالعلاقات بين تلك النجوم متنوعة بشكل كبير. يمكن أن يكون زوج النجوم كبيرًا وصغيرًا، ويمكن أن تكون الشخصيات باردة وساخنة. هناك أخذ وعطاء من كلا الجانبين، وحياة أحدهما تؤثر بعمق على الآخر. وأحيانًا يخرج أحد الشريكين من العلاقة، ودائمًا ما يموت أحد الشريكين قبل الآخر. ولكن بالنسبة إلى النجوم يمكن لتلك العلاقة الوثيقة أن تؤدي إلى الحياة بعد الموت.

تخيل نجمين عاديين يدور كلٌّ منهما حول الآخر في بداية حياتيهما، ويدمجان ذرات الهيدروجين ويحولانها إلى هيليوم. يستنفد النجم الأكثر ضخامة هيدروجينه أولًا ويتحول إلى عملاق أحمر، مريقًا الغاز على رفيقه. ومع انغماس كلا النجمين في الغاز، يصبحان أقرب إلى بعضهما، ثم يموت النجم الأكثر ضخامة، وينضغط متحولًا إلى قزم أبيض. وفي نهاية المطاف، يهرم النجم الأقل ضخامة ويتضخم ويلقي بالغاز على رفيقه الميت. فتضغط الجاذبية القوية الشديدة التي يتسم بها القزم الأبيض الغاز بما يكفي لبدء عمليات الاندماج النووي، ويشتعل سطحه لفترة قصيرة وتدبُّ فيه الحياة. ويطلق على هذا اسم «نوفا» أو «نجم جديد». يطرد هذا الاندماج العنيف الكثير من الغاز، وربما تتكرر العملية بشكل عرضي، وفي بعض الأحيان تجعل النوفا ذاك النجم الوهاج واضحًا للعين المجردة بعد أن كان يظهر في شكل وهج خافت في التلسكوب.[٣٧] وإذا كان انتقال الكتلة كبيرًا بما فيه الكفاية، ربما يتخطى القزم الأبيض حد تشاندراسخار البالغ ١٫٤ ضعف كتلة الشمس. وفي هذه الحالة يموت النجم الميت سابقًا للمرة الثانية كمستعرٍ أعظم، مُخلفًا وراءه نجمًا نيوترونيًّا.[٣٨]

إليك قصة حياة ثنائي نجمي تنتهي باستحالته ثقبًا أسود.[٣٩] يعيش نجمان فائقا الضخامة في مدار ثنائي ضيق، ويستنفد النجم الأكثر ضخامة الهيدروجين في لبِّه ويتمدد، مريقًا معظم غلافه الغازي على رفيقه، وتاركًا وراءه نواة هيليوم عارية. وبعد عدة مئات الآلاف من السنين، يموت بعنف كمستعر أعظم، مُخلفًا وراءه ثقبًا أسود.



شكل ١٧: التسلسل التطوري الذي يؤدي إلى نظام ثنائي نادر يحتوي على ثقبين أسودين. في أعلى اليسار، تبدأ النجوم في «مرحلة التسلسل العمري الأساسي ابتداءً من الصفر». يريق النجم الأكثر ضخامة موادًا على رفيقه عن طريق فيض حيز روش. بعد مرور بعض الوقت في مرحلة «وولف-رايت»، يموت النجم الأكثر ضخامة كمستعر أعظم ثم ثقب أسود. ثم يُصدِر أشعة سينية، حيث يكون في حالة ثنائي الأشعة السينية عالي الكتلة. ثم يدخل النجمان غلافًا مشتركًا. ثم يموت النجم الثاني على الشاكلة نفسها. ثم يندمج الثقبان الأسودان في النهاية في ثقب أسود أكبر.

«بابلو ميرشانت/مجلة علم الفلك والفيزياء الفلكية، المجلد ٥٨٨، صفحة A٥٠، ٢٠١٦، منسوخة بإذن/صاحب حقوق النشر المرصد الأوروبي الجنوبي»

أما الرفيق الأقل ضخامة فيكتسب الغاز من الانفجار، مما يزيد سرعة تطوره. وبعد عشرة آلاف سنة يتضخم عند وصوله إلى نهاية حياته، ممَّا يؤدي إلى إلقاء الغاز على الثقب الأسود وحدوث انبعاث كثيف للأشعة السينية. ثم ينفجر أيضًا ويتحول إلى مستعر أعظم، واعتمادًا على كتلته يشتمل النظام في النهاية إما على نجم نيوتروني وثقب أسود، أو ثقبين أسودين (شكل ١٧).

تعد الثقوب السوداء من العجائب، ولكنها نتيجة حتمية لتطور النجوم الضخمة. وإذا وُجِدَت هذه النجوم في أنظمة ثنائية، فسيسمح التفاعل الحادث بين كل نجمين لنا

برصدهما، إنه في كل ثانية تمر في مكان ما في الكون، يموت نجم ضخم ميتة عنيفة. وفي كل ثانية تتقلص رقعة من الزمكان وتختفي، وفي كل ثانية يُولد ثقب أسود.

لكن ماذا لو كانت هناك طريقة أخرى لتكوُّن الثقوب السوداء؟ وماذا لو كانت النتيجة أكثر ضخامة من أي شيء تخيلناه في السابق؟



الفصل الثالث

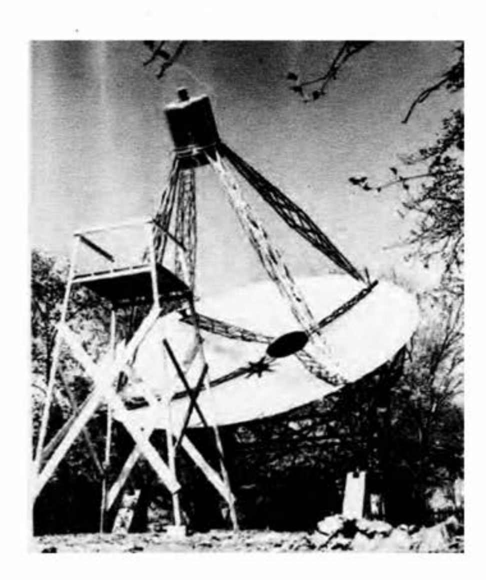
الثقوب السوداء فائقة الضخامة

هل من أنواع أخرى للثقوب السوداء غير النجوم الميتة؟ إنَّ تكوُّن الثقب الأسود يتطلب كثافة عالية بما يكفي لتوليد جاذبية قوية لا يمكن لأي ضوء الهروب منها. من حيث المبدأ يمكن أن يحدث هذا في الأجسام التي تفوق النجم المنضغط حجمًا أو تصغره. ومع ذلك كانت مفاجأة عندما اكتُشِفت الثقوب السوداء فائقة الضخامة، حيث إن بعضها ضخم لدرجة أنه يتجاوز مجموع جميع الثقوب السوداء النجمية في مجرَّتنا. وقد كانت مفاجأة أكبر أن نعلم أن أحدها موجود في مركز كل مجرَّة.

عالم الفلك الراديوي الوحيد في العالم

حل صيف عام ١٩٣٧ حارًا رطبًا على بلدة ويتون بولاية إلينوي. وكان جروت ريبر البالغ من العمر ستة وعشرين عامًا معتادًا على أن يذهب إلى قطعة أرض فضاء تجاور منزل والدته كل يوم، حيث كان يواصل قطع الخشب وتشكيل المعدن من السابعة صباحًا حتى حلول الليل. لقد كان يبني تلسكوبًا راديويًّا. وكان قطر طبقه يبلغ ١٠ أمتار، وهو أكبر ما استطاع بناءه باستخدام المواد المتاحة.[1] وعندما اكتمل بناؤه، صار هذا التلسكوب الراديوي الأكبر من نوعه على وجه الأرض، وقد كان مقدمة للإصدارات الحديثة التي يصل قطرها إلى ١٠٠ متر. وعلى مدى عقد من الزمان، كان ريبر هو عالم الفلك الراديوي الوحيد في العالم (شكل ١٨).

لكنه لم يكن أول من قام بذلك. كان كارل جانسكي خبيرًا في الفيزياء ولم يكن قد تجاوز الثالثة والعشرين من عمره عندما تم توظيفه في مختبرات بيل في هولمدل بنيو جيرسي. أرادت الشركة دراسة إمكانية استخدام موجات الراديو التي يتراوح طولها بين ١٠ و٢٠ متر لتوفير خدمات الهواتف عبر الأطلسي. كانت مهمة جانسكي هي دراسة مصادر التشويش التي قد تتداخل مع الاتصالات الصوتية. وفي عام ١٩٣٠، بنى



شكل ١٨: أول تلسكوب راديوي ذو طبق قطع مكافئ في العالم، قام ببنائه عالم الفلك الراديوي الهاوي جروت ريبر في عام ١٩٣٧. وكان أول تلسكوب راديوي عبارة عن هوائي ثنائي القطب صنعه كارل جانسكي. بُني الطبق الذي يبلغ طول قطره ٩ أمتار في فناء ريبر الخلفي في ويتون بولاية إلينوي. وكان يمثل نموذجًا أوليًا لجميع الأطباق المستقبلية في مجال علم الفلك الراديوي الناشئ.

«جروت ريبر»

هوائيًا في حقل بطاطس بور بالقرب من المختبر. بدا هذا الشيء الغريب كجناح الطائرة ثنائية السطح، وكان محوره على مسار دائري ذي أربع عجلات مغطاة بالمطاط من طراز تي فورد. ومن خلال تدوير الهوائي، كان بإمكان جانسكي تحديد اتجاه الموجات الراديوية الواردة، بينما كان يتم تضخيم الإشارات اللاسلكية وتسجيلها بواسطة قلم على مخطط ورقي متحرك في كوخ قريب. كان في أغلب الأوقات يرصد التشوش الناتج عن العواصف الرعدية القريبة، ولكن كان هناك أيضًا هسيس راديوي خافت. وفي غضون عام، كان جانسكي قد نجح في إظهار أن هذا الهسيس لم يكن ناتجًا عن مصدر أرضي؛ فقد كان يتبع التوقيت النجمي، فلا يعلو وينخفض كل ٢٤ ساعة، ولكن كل ٢٣ ساعة و٥٦ دقيقة.[٢] كان الإشعاع أقوى باتجاه مركز درب التبانة، في كوكبة القوس. أثار اكتشاف جانسكي ضجة كبيرة، وفي الخامس من مايو عام ١٩٣٣، نشرت صحيفة نيويورك تايمز تقريرًا عنه.[٣]

مثلت تلك ولادة طريقة جديدة لدراسة الكون.[٤] فلآلاف السنين اعتمد علم الفلك على استخدام العين المجردة، وبعد مرور مئات السنين على استخدام جاليليو للتلسكوب لأول مرة، جاءت جميع المعلومات من الفضاء في نطاق ضئيل من الأطوال الموجية البصرية: نطاق بين لونين فقط من أغمق درجات الأحمر إلى أغمق درجات الأزرق الذي يمكن للعين رؤيته. أما الآن فقد سجل البشر إشارات من منطقة جديدة تمامًا من الطيف الكهرومغناطيسي. اقترح جانسكي إنشاء طبق راديوي بقطر ٣٠ متر

حتى يتمكن من متابعة اكتشافه، ولكن لم تكن مختبرات بيل مهتمة بهذا، وكلفوا جانسكي بمشروع آخر، ولم يعد لممارسة علم الفلك الراديوي.

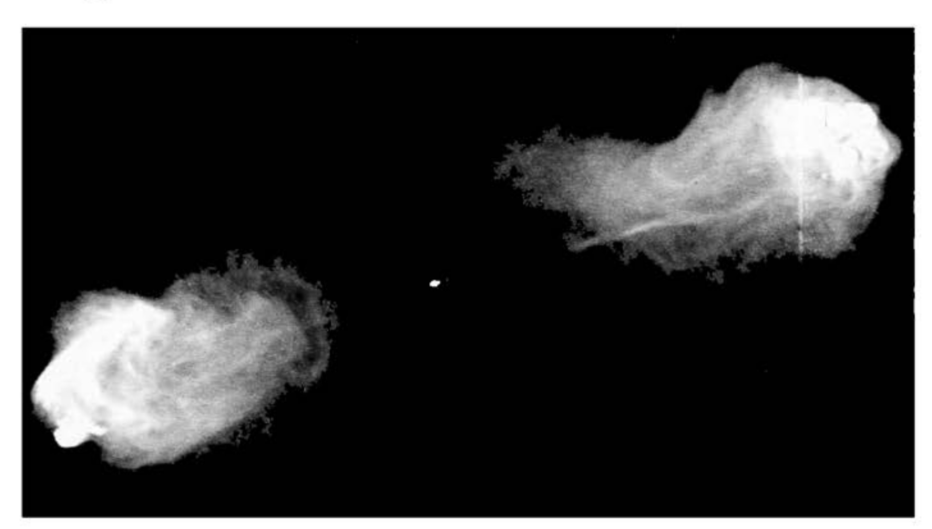
أثار عمل جانسكي فضول ريبر بشأن مصدر هذه الموجات الراديوية الكونية. ففي أوائل ثلاثينيات القرن العشرين، تقدم بطلب للعمل مع جانسكي في مختبرات بيل، ولكن خلال فترة الكساد العظيم لم تكن هناك فرص للتوظيف؛ لذلك فقد علَّم نفسه كيفية بناء تلسكوب وجهاز استقبال، واستمتع بالعمل بمفرده. يقول هو عن هذا: «لم يكن هناك وصي عليَّ ينصب نفسه رقيبًا على عملي ويسدي إليَّ نصائح سيئة».[٥] كان يتبع نمطًا محددًا في عمله؛ ففي النهار، كان يصمم أجهزة استقبال لاسلكية في مصنع في شيكاغو القريبة منه، وبعد العشاء، كان ينام لمدة أربع أو خمس ساعات، ثم بدءًا من منتصف الليل حتى شروق الشمس كان طبقه يجوب أنحاء السماء بينما كان يجلس في الطابق السفلي لتسجيل الإشارات اللاسلكية بفترات فاصلة تبلغ دقيقة واحدة. لكنه استطاع في النهاية تطوير جهاز الاستقبال الخاص به واشترى مسجل مخططات أوتوماتيكيًّا حتى لا يضطر إلى السهر طوال الليل، وقد مكن هذا ريبر من البدء في أول عملية مسح للإشارات الراديوية.

كان ريبر معزولًا؛ فلم يكن لديه نظراء ليتبادل الأفكار معهم، وكان يعمل عبر أطوال موجية غير مستكشفة. تخيل أنك أول نحات في العالم؛ وجميع الأشخاص الآخرون يقومون بالرسم والتلوين ولكن لا أحد آخر ينشئ أعمالًا فنية ثلاثية الأبعاد. وبما أنه لا أحد يتحدث بلغتك، ستكون وحيدًا. لم يبدِ المهندسون أي اهتمام يذكر بعمل ريبر الذي نشره في مجلة هندسة راديوية كما فعل يانسكي من قبله. وفي هذه الأثناء، كان علماء الفلك غير مهتمين أو متشككين. وبعد تأكيد ريبر على اكتشاف جانسكي للموجات الراديوية القادمة من درب التبانة في عام ١٩٤٠، قدم ورقة حول ما أسماه «التشويش الكوني» إلى دورية «الفيزياء الفلكية». فقام المحرر أوتو ستروف بإرسال الورقة البحثية إلى العديد من المُحكِّمين العلميين. لم يفهم المهندسون الفرضيات الفلكية، واحتار علماء الفلك بسبب المصطلحات الراديوية، ولم يكن أحد منهم على استعداد للتوصية بنشرها. فقرر ستروف نشرها على أي حال.[٦] وواصل عالم الفلك الراديوي الوحيد في العالم عمله وحيدًا.

رسم ريبر خريطة للسماء بعناية ودقة، فكان يعمل باستخدام أطوال موجات راديوية أقصر على التوالي، عالِمًا أنها ستوفر مواقع أكثر دقة للانبعاثات الراديوية.

ومن خلال العمل على عدة أطوال موجية، استطاع تشخيص العملية الفيزيائية المسببة للإشعاع. ففي عام ١٩٤٤ كتب ورقة بحثية تحتوي على أول خريطة على الإطلاق للسماء الراديوية.[٧] كما أوضح البحث أن عملية انبعاث الموجات الراديوية الكونية كانت لا حرارية، وبالتالي تختلف عن الأشعة التي تأتي من جسم بدرجة حرارة ثابتة، وأظهرت خرائطه أن الإشعاع يتركز في درب التبانة، مع نقطتي انبعاث قويتين أخريين، في كوكبة ذات الكرسي وكوكبة الدجاجة. وسيتضح لاحقًا أن النقطة الأولى هي بقايا مستعر أعظم تقع على بُعد ١١٠٠ سنة ضوئية، وسيتضح في النهاية أن النقطة الثانية – والتي هي بمحض الصدفة لا تبعد كثيرًا عن الثقب الأسود النموذجي الدجاجة إكس-١ – مجرَّة ذات انبعاث راديوي قوي للغاية تقع على بُعد نصف مليار سنة ضوئية.

استغرق الفلكيون بعض الوقت لفهم طبيعة هذه المجرَّة، التي يطلق عليها اسم «الدجاجة إيه Cygnus A»، والتي تعد أقوى مصدر راديوي في السماء (شكل ١٩). وقد جعل هذا الاكتشاف ريبر يعتبر شخصًا محطِّمًا للمعتقدات. حتى إنه نصح طالبًا



شكل ١٩: تعد كوكبة «الدجاجة إيه» أحد أقوى مصادر الانبعاثات الراديوية في السماء. التُقِطَت هذه الصورة باستخدام مقياس تداخل راديوي يسمى «مصفوفة المراصد الكبيرة». ومن المعروف الآن أن البقعة الراديوية الساطعة في المركز هي ثقب أسود فائق الضخامة في مجرَّة تبعد ٦٠٠ مليون سنة ضوئية. وتُصدر دفقات من البلازما عالية الطاقة إلى خارج اللُّب وتخلق «فصوصًا» متطايرة من الانبعاثات الراديوية إلى خارج المجرَّة.

«آر بيرلي، سي كاريلي، جيه درير/ المرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي»

شابًّا ذات مرة قائلًا: «اختر مجالاً ليس معروفًا عنه سوى القليل وتخصص فيه. ولكن لا تقبل كل نظرياته الحاليَّة كحقيقة مطلقة. ولو كان الجميع ينظرون إلى الأسفل، فانظر أنت إلى الأعلى أو ناحية اتجاه مختلف، فربما تتفاجأ بما ستجده».[٨]

مجرَّات ذوات نُوى ساطعة

لا يتدفق العلم كالنهر، فنادرًا ما يمخر العلماء بسلاسة عباب بحر الفهم، فهم في كثير من الأحيان مستكشفون يجوزون تضاريس صعبة؛ أحيانًا في وضح النهار وبتقدُّم ثابت، وأحيانًا أخرى خلال الضباب دون بوصلة. يواجهون منعطفات ونهايات مسدودة. كما أن أولئك الذين يعملون على تحقيق الهدف نفسه ليسوا على تواصل دائم بالضرورة، أو ربما حتى قد لا يعرف أحد منهم بوجود الآخر. ومن النادر أن يكون شخص ما ذكيًا بما فيه الكفاية، أو محظوظًا بما فيه الكفاية، كي يرتقي مرتقًا يشاهد منه الصورة الشاملة.

في مطلع القرن العشرين احتدم الجدل في علم الفلك حول طبيعة «السديم»، وهي بقع الضوء غير الواضحة التي رسم وليام هيرشل (وآخرون) ملامحها قبل أكثر من ١٠٠ عام. ولأن العديد منها يمتلك بنية حلزونية ولا يقع بالقرب من مستوى مجرَّة درب التبانة، على غرار معظم مناطق تكوين النجوم، فقد بدأ علماء الفلك يأخذون على محمل الجد تلك الفرضية القائلة بأنها «جزر كونية»، أي أنظمة منفصلة من النجوم تقع على بعد مسافات هائلة من مجرَّتنا. ولو كان الأمر كذلك، ستبدو أطيافها كمجموع ضوء العديد من النجوم، وتتضمن خطوط الامتصاص نفسها التي تظهر في الشمس والنجوم الأخرى. في عام ١٩٠٨ درس إدوارد فات في مرصد ليك طيف السديم «إن جي سي ١٠٦٨» (NGC 1068) وفوجئ برؤية ستة خطوط انبعاث قوية إلى جانب خطوط الامتصاص، وهي السمة التي لا يمكن ظهورها إلا إذا تم تسخين الغاز بواسطة مصدر طاقة قوي.[٩] في ذلك الوقت كانت النتيجة مدهشة لدرجة أنها تعرضت للتجاهل، ولم يُثبت إدوين هابل أن «إن جي سي ١٠٦٨»، في الواقع، مجرَّة قبل عقدين من الزمان تليا ذلك.[١٠]

في أوائل أربعينيات القرن العشرين كان كارل سيفرت باحثًا في برنامج ما بعد الدكتوراه في مرصد جبل ويلسون في جنوب كاليفورنيا، ولأن إدوين هابل كان مشرفًا

عليه، فقد استخدم سيفرت التلسكوبات التي يبلغ قطرها ٦٠ بوصة و١٠٠ بوصة، والتي كانت الأقوى من التلسكوبات المتاحة آنذاك، من أجل بحثه.[١١] وقت أن جمع سيفرت بياناته كانت لوس أنجلوس يقطنها ثلث من يقطنونها حاليًّا وتضيئها عُشر الإضاءة الحالية. كما أنه استفاد أيضًا من التعتيم الذي تم فرضه هناك بعد الهجوم على بيرل هاربر. فقد قام بأخذ أطياف نُوى المجرَّات الساطعة ووجد نصف دزينة من المجرَّات تشبه إن جي سي ١٠٦٨، مع دلالة خطوط الانبعاث اللامعة على وجود عمليات نشطة. كما أشار أيضًا إلى أن خطوط الانبعاثات عريضة للغاية، وإن عرض خط الانبعاث يشير إلى نطاق حركة الغاز. في المجرَّة الحلزونية العادية، تبلغ أقصى سرعة للدوران ما بين الـ ٢٠٠ و٣٠٠ كيلومتر في الثانية؛ مع ذلك، كان سيفرت يقيس عرض دوبلر بآلاف الكيلومترات في الثانية، ممَّا يشير إلى أن الغاز بالقرب من مركز هذه المجرَّات يتحرك بسرعة أكبر بعشرة أضعاف أو عشرين ضعفًا لسرعة أي شيء قد تم قياسه سابقًا. والمواد المتحركة بهذه السرعة ستطير بعيدًا عن المجرَّة ما لم تثبتها كتلة كبيرة بالقرب من المركز.

كان أمام سيفرت لغزًا ينبغي حله؛ ما الذي يمكن أن يسبب حركة سريعة للغاز في مركز مجرَّة؟ في ذلك الوقت لم يكن أحد يعلم. وكما كان بحث جروت ريبر حول «التشويش الكوني» الذي كتبه في العام الذي تلاه، لم يسبب بحث سيفرت أي أثر في عالم الفلك. ولم يُشَر إليه كمرجع في أي بحث لمدة ستة عشر عامًا بعد نشره.[١٢] ووقعت فئة المجرَّات التي سُميت في النهاية باسم سيفرت في طي النسيان. وفي غضون ذلك جاءت أفكار جديدة من التقدم التقني في علم الفلك الراديوي.

نضوج علم الفلك الراديوي

خلال أربعينيات القرن العشرين ومع اندلاع الحرب بدت العلوم البحتة أمرًا غير ذي صلة بالواقع، ومع ذلك فقد لعب العديد من علماء الفلك الراديوي دورًا مهمًا في تطوير الرادار، والذي كان بدوره محوريًّا في نتيجة الحرب العالمية الثانية؛ فقد كان الفريق الذي يكتشف طائرات أو سفن أو غواصات العدو أولًا هو الفريق الفائز في المعارك. كما قام المهندسون والعلماء البريطانيون والأمريكيون بتطوير رادار يستطيع أن «يرى» على بُعد مئات الأميال، وحتى في الليل. وقد ساعد هذا الرادار على إغراق

الغواصات الألمانية، وسمح للبريطانيين برصد قاذفات القنابل القادمة، ووفر غطاءً لعملية الإنزال في نورماندي. ولهذا فكثيرًا ما يُقال إن القنبلة الذرية أنهت الحرب، ولكن الرادار هو الذي حقق الانتصار.

لقد أدى الرادار أيضًا إلى اكتشافات فلكية؛ ففي عام ١٩٤٢ كان ستانلي هاي - الباحث بمجموعة أبحاث العمليات العسكرية - متحيرًا بسبب التشويش الشديد الحادث في أجهزة الرادار الدفاعية الساحلية في إنجلترا. وأدرك أن ذلك التشويش لم يكن قادمًا من العدو، بل من الشمس. ولاحقًا خلال الحرب، اكتشف المسارات المتأينة للنيازك أثناء محاولته تتبع صواريخ «فاو-٢» الألمانية. لكن أيًّا من هذين الاكتشافين لم يتأتَّ نشرهما قبل انتهاء الحرب. كما أكدت مجموعته أيضًا وجود مصدر الانبعاث الراديوي «الدجاجة إيه» ذلك وأكدت كذلك على قوته. وبعد الحرب، واصل العمل العسكري في «مؤسسة الرادار الملكية» في جنوب إنجلترا، بينما تحول آخرون ممَّن عملوا في وقت الحرب على الرادار إلى رائدين في علم الفلك الراديوي. أنشأ مارتن رايل «مختبر كافندش» في جامعة كامبريدج، وأسس برنارد لوفل «مرصد جوردل بانك» كمحطة ميدانية في جامعة مانشستر.[١٣]

أصبحت أستراليا قوة في علم الفلك الراديوي بسبب الخبرة الفنية التي ساهمت بها في جهود الحلفاء الحربية، فقد كان أحد أفضل مختبرات الرادار في العالم في زمن الحرب يقع في سيدني، وبعد الحرب بقي المختبر كما هو، مع تحوُّل الموظفين إلى دراسة «الضوضاء» الراديوية الكونية. وكان من بين الجديرين بالذكر روبي باين-سكوت، وهي واحدة من أفضل الفيزيائيين الأستراليين على الإطلاق، وأول عالمة فلك راديوي في العالم. وبعد أن ساهمت في الجهود الحربية، كانت أول مَن درس الدفقات الراديوية الشمسية، وطورت الصيغ الرياضية لنوعية قياس التداخل المستخدم في المصفوفات الراديوية في جميع أنحاء العالم. وقد حاربت التفرقة الجنسية طوال حياتها المهنية، واضطرت إلى إخفاء زواجها، حيث لم يكن يُسمَح للنساء المتزوجات في تلك الفترة بأداء وظائف بدوام كامل في قطاع الخدمة المدنية.[١٤]

وفي الوقت نفسه وضع علم الفلك الأوروبي بداية النهاية للحرب عن طريق إعادة نشر هوائيات ذات قطر يبلغ ٧,٥ أمتار من منشآت الرادار الألمانية في المراصد الوطنية في بريطانيا وهولندا وفرنسا والسويد وتشيكوسلوفاكيا. وهي قصة ذات نهاية ممتعة تدور حول السيوف التي تحولت إلى شفرات محاريث علمية.

في عام ١٩٤٦ استخدم ستانلي هاي وزملاؤه هوائي رادار مضادًا للطائرات معدَّلًا لإثبات أن انبعاثات «الدجاجة إيه» كانت تتفاوت من دقيقة إلى دقيقة. وبما أن الضوء لا يستطيع إلا أن يسافر لمسافة معينة في مثل هذا القدر الضئيل من الوقت، فإن أي جدول زمني للاختلافات يحدد مقياس الحجم لمصدر الإشعاع. ولا يمكن رؤية تلك التفاوتات السريعة إلا في مصادر الإشعاع الصغيرة جدًّا. في تلك الحالة قد تم تحديد حجم الجرم السماوي بأنه صغير جدًّا، بحجم نجم. أشار مارتن رايل إلى أن «الدجاجة إيه» ربما يكون نوعًا جديدًا من النجوم الساطعة في الأطوال الموجية الراديوية، ولكنها غير مرئية عند الأطوال الموجية البصرية: «نجم راديوي». وأثار هذا حيرة بين الجميع.[١٥] فالنجوم التي تشبه الشمس تنبعث منها كميات ضعيفة من الموجات الراديوية، فكيف يمكن لنجم أن يكون مصدرًا راديويًّا ساطعًا بهذه الدرجة؟ وقد علَّق عالم الفلك الراديوي جيه جي ديفيس على هذا قائلًا: «يبدو أن هناك كونًا ضوئيًّا وكونًا آخر راديويًّا يختلف أحدهما عن الآخر تمام الاختلاف، لكنهما يوجدان معًا؛ لذا كان من الواضح أن هناك حاجة إلى ربطهما ببعضهما بطريقة أو بأخرى».[١٦]

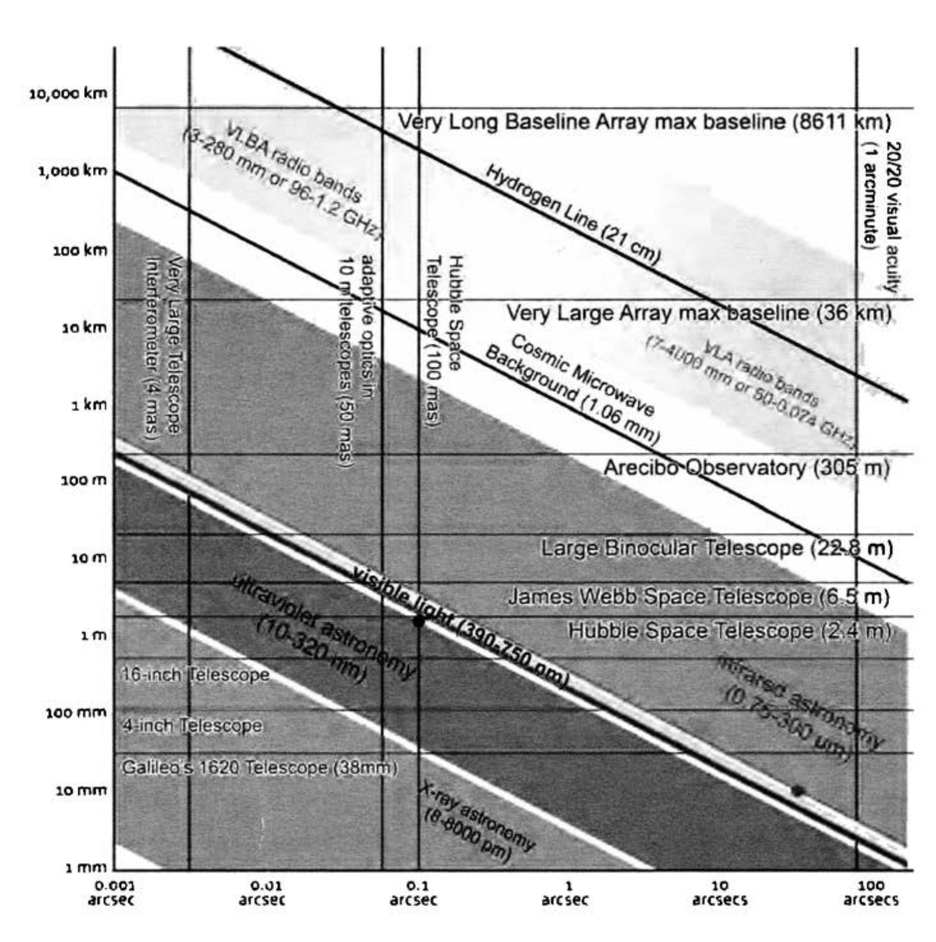
كان العائق أمام التقدم في علم الفلك الراديوي هو الاستبانة الزاوية؛ أي أصغر زاوية يمكن لأي تلسكوب أن يميزها. والاستبانة الزاوية الأفضل تعني زاوية أصغر. إذا كانت مصادر الضوء قريبة من بعضها بدرجة أكبر من الاستبانة الزاوية للتلسكوب، فإنها تشوش على بعضها. كما تؤثر الاستبانة الزاوية أيضًا على عمق الرؤية؛ فعندما تشوش المصادر على بعضها بعضًا، من المستحيل معرفة أيها أقرب وأيها أكثر بعدًا. تخيل أنك تعاني من قصر النظر في غرفة كبيرة مليئة بالناس. ربما ترى بضعة وجوه الأقرب إليك، لكن البقية ستكون مشوشة بشدة. وسيصعب عليك حتى أن تحصي عددًا منهم في الغرفة، لكنك إذا ارتديت نظارتك، سيصبح كل شيء واضحًا على الفور.

تتطلب الصور الأعلى دقة إما موجات أقصر أو تلسكوبًا أكبر.[١٧] وتتناسب الاستبانة الزاوية مع الطول الموجي المرصود وتتناسب عكسيًّا مع حجم التلسكوب، وتعد الموجات الراديوية أطول بملايين المرات من الموجات الضوئية؛ لذلك يجد علماء الفلك الراديوي أمامهم عائقًا كبيرًا منذ البداية بالمقارنة مع نظرائهم في علم الفلك البصري، فيعوضون ذلك جزئيًّا عن طريق بناء التلسكوبات الكبيرة. وكان طبق جروت ريبر يبلغ قطره ٩,٤ أمتار، وكان أكبر من أي تلسكوب بصري موجود في ذلك الوقت. وكانت أعلى صوره وضوحًا بعرض ١٥ درجة، وهو طول ذراع مفرودة مع

قبضة اليد. هناك كثير من الموجودات البصرية في رقعة السماء الفسيحة؛ لذا كان من المستحيل على ريبر أن يستنتج مصدر الموجات الراديوية. وبالانتقال إلى ترددات أعلى، ما يعني طولاً موجيًّا أقصر - ٢٠٠ سنتيمتر بدلًا من مترين - يمكن الحصول على عشرة أضعاف الوضوح. وللتوضيح، فإن موجات الضوء المرئية أصغر بمقدار ٣ ملايين مرة من الموجات التي يبلغ طولها ٢ متر التي رصدها ريبر، والتلسكوب البصري بقطر تلسكوب ريبر نفسه سيصنع صورًا أكثر وضوحًا بمليون مرة. ومن أجل إنتاج صورة واضحة مثل صورة تلسكوب بصري بقطر ١ متر، يتطلب ذلك تلسكوبًا راديويًّا بحجم الولايات المتحدة!

لقد قام اختراع قياس التداخل بحل هذه المشكلة، ففي مقياس التداخل تُدمج الموجات الواردة من تلسكوبين راديويين (أو أكثر) مع طور الموجة للموجات المحفوظة؛ أي التوقيت الدقيق لوصول القمم والقيعان. وهكذا، تتحدد الدقة الزاوية بالمسافة الفاصلة بين التلسكوبات وليس حجمها، بحيث يكون طبقان بقطر ١٠ أمتار يفصل بينهما كيلومتر واحد يتمتعان بدقة زاوية أفضل ١٠٠ مرة من الطبق المستخدم بشكل منفصل.[١٨] وتسمى هذه التقنية أيضًا «توليف الكوة»؛ لأنها تتضمن «توليف» تلسكوب بقوة شديدة لتلسكوب أكبر منه بكثير. وفي عام ١٩٥٠ استخدم جرايم سميث في مختبر كافنديش بجامعة كامبريدج هوائيين ألمانيين مغيرًا غرض استخدامهما من أجل قياس موقع مصدر الإشعاع الساطع «الدجاجة إيه» بدقة دقيقة قوسية واحدة أو واحد على ثلاثين من قطر القمر، وهو ارتقاء تقني مهم للغاية (شكل ٢٠).

لفت القياس الدقيق للموقع «الدجاجة إيه» انتباه فالتر بادي، عالم الفلك في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، ففي غضون أسبوعين من تلقيه تلك البيانات من سميث، كان بادي في حجرة الرصد الخاصة بالتلسكوب ذي القطر ٢٠٠ بوصة على جبل بالومار، وهو أقوى تلسكوب بصري في العالم. لم يُسمح للفلكي ألماني المولد بالانخراط في الجيش خلال الحرب العالمية الثانية؛ لذلك فقد قام - كما فعل كارل سيفرت - باستغلال انقطاع التيار الكهربائي في لوس أنجلوس في فترة الحرب؛ لالتقاط صور لعمق لم يسبق له مثيل في سماء الليل. ثمة مشهد بسيط من مقابلة صحفية لاحقة يقدم صورة معبرة عن هذا: «عندما أعلن ما شاهده واكتشفه في هذا المسح الدقيق لآلاف اللوحات، بدأت عظمة عالم السماء المذهلة - عالم هذه المجرَّة وما هو خارجها - تتكشف خلف الأرقام والصور والمحادثات الفلكية. هذا الرجل، الذي كان يرتدي



شكل ٢٠: مخطط لوغاريتمي لحجم التلسكوب مقابل الدقة الزاوية، أو القدرة على إظهار السمات البسيطة في الجرم الفلكي. نشير هنا إلى أن الحجم الزاوي للقمر يساوي ١٨٠٠ ثانية قوسية. النقطة عند ١٠ مم و٢٠ ثانية قوسية هي العين المجردة، والنقطة عند الكوة ٢,٤ متر ودقة ٠,١ ثانية قوسية تمثل تلسكوب هابل الفضائي. وتُعرض أطوال موجات الإشعاع الكهرومغناطيسي كخطوط قُطرية، تتزايد من الأشعة السينية في الأسفل يسارًا إلى الموجات الراديوية في الأعلى يمينًا. ويبلغ حجم أكبر التلسكوبات المنفردة نحو ١٠ أمتار عند الأطوال الموجية الضوئية، ونحو ٣٠٠ متر عند الأطوال الموجية الراديوية. وتحاكي مقاييس التداخل تلسكوبًا كبيرًا جدًّا، ومن ثمَّ تعطي دقة زاوية عالية جدًّا.

«كريس إمبي»

رابطة عنق زرقاء داكنة وحُلَّة رمادية، وينتعل حذاءً بنيًّا كبيرًا، كان مفتونًا تمامًا بأبحاثه. كان لا يفتأ يتساءل ويدخن، بشعره الأبيض الخفيف المجزَّأ بعناية، وحاجبيه الأبيضين الكثيفين إلى حدٍّ ما، وبأنفه المعقوفة الناتئة. لقد نظر بادي إلى غموض الكون كما ينظر أعظم المحققين في القصص البوليسية حيث هو المحقق الرئيسي في القصة».[١٩]

عندما وجَّه بادي التلسكوب ذي الحجم ٢٠٠ بوصة - المُلقَّب ب «العين الكبيرة» - تجاه «الدجاجة إيه»، أبهرته لوحات التصوير الفوتوغرافي الواردة، فقال: «في اللحظة التي نظرت فيها إلى الصور السالبة (النيجاتيف) أدركت على الفور أن فيها شيئًا استثنائيًّا؛ الكثير من المجرَّات في جميع أرجاء اللوحة، أكثر من ٢٠٠ مجرَّة، وكانت ألمعها في المركز. وكانت تظهر علامات تدل على التشوُّه المدي، أي قوة سحب الجاذبية بين النواتين، ولم أرَ قط شيئًا مثل ذلك من قبل. كان الأمر عالقًا في ذهني بشدة لدرجة أنه بينما كنت أقود سيارتي إلى المنزل لتناول العشاء، اضطررت إلى إيقاف السيارة والتفكير في الأمر».[٢٠] ومن خلال التعاون بين علماء الفلك الراديوي والبصري، تمت الإجابة على سؤال مهم على النحو التالي: كانت «الدجاجة إيه» مجرَّة بعيدة مشوَّهة الصور. وكانت خطوط طيفها تنزاح نحو الأحمر بنسبة ٥,٦٪، ممَّا يشير إلى أنها تبتعد بسرعة ٣٥ مليون ميل في الساعة. وبمصطلحات نموذج الكون المتوسع، حيث يشير الانزياح إلى الأحمر إلى المسافة، فإن هذا يعني أنها كانت على بُعد ٧٥٠ مليون سنة ضوئية، وأن الموجات الراديوية التي نراها الآن انبعثت عندما كانت أشكال الحياة على الأرض لا تزيد عن حجم رأس دبوس.

كان بادي يفكر في القوة التي قد تنجم عن «حطام قطار» كوني، واقترح أن «الدجاجة إيه» الفائق السطوع يتكون من مجرَّتين متصادمتين. شكَّك رودولف مينكوفسكي - أحد زملاء بادي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا - في نظريته، وحاول بادي أن يراهنه على ألف دولار أن فرضيته ستثبت صحتها. (من الواضح أن مُنظِّري الثقوب السوداء ليسوا العلماء الوحيدين المحبين للمراهنات). وفي ذلك الوقت، كان هذا المبلغ يساوي مرتب شهر واحد، لم يوافق مينكوفسكي؛ لذا خفَّض بادي الرهان إلى زجاجة من الويسكي. سلَّم مينكوفسكي بخسارة الرهان بعد أن أخذ طيفًا يُظهِر خطوط الانبعاثات من غاز شديد السخونة بالقرب من مركز «الدجاجة إيه». عندما تصطدم مجرَّتان فإن حرارة الغاز الذي تحتويانه ترتفع. (لاحقًا شكا بادي من أن مينكوفسكي دفع رهانه في شكل قارورة يعاد تعبئتها مليئة بالويسكي وليس زجاجة، ثم

تجرَّع كل ما في تلك القارورة في زيارة لاحقة إلى مكتب بادي). ومع ذلك، قرر عدد من المُنظِّرين في وقت لاحق، ومن خلال حسابات دقيقة، أن ذلك التصادم لا يمكن أن يفسر السطوع الراديوي. لكن بقي سؤال رئيسي دون إجابة: كيف يمكن لمجرَّة «الدجاجة إيه» أن تنبعث منها موجات تبلغ ١٠ ملايين ضعف للموجات الراديوية الصادرة عن مجرَّة درب التبانة؟

عالم فلكي هولندي يكتشف الكوازارات

في عام ١٩٥٠ قُدمت آلية جديدة للموجات الراديوية الكونية.[٢١] عندما تتحرك الإلكترونات بسرعة قريبة من سرعة الضوء في مجال مغناطيسي، فإنها تتحرك بنمط حلزوني وتطلق إشعاعات مكثفة عبر نطاق واسع من الأطوال الموجية، وهذا ما يسمى «إشعاع سنكروتروني». صُنع الإشعاع السنكروتروني في مُسرِّعات الجسيمات في المختبرات في أربعينيات القرن العشرين، ولكن المفاجأة هنا هو أن هذه العملية يمكن أن تحدث عندما يتم تسريع الجسيمات في مناطق الفضاء التي تبعد عنَّا مئات أو آلاف من السنوات الضوئية. وفي عام ١٩٥٨ في مؤتمر دولي لعلم الفيزياء الفلكية في باريس، قدم العلماء أبحاثًا تفيد بأن الإشعاع السنكروتروني يمكن أن يفسر التوهجات الشمسية، والشفق الناتج عن المستعر الأعظم ١٠٥٤ في سديم السرطان، والمجرَّة الإهليلجية الغريبة «مسييه ٨٧» (أو «العذراء أ»)، وربما أيضًا مجرَّة «الدجاجة إيه».

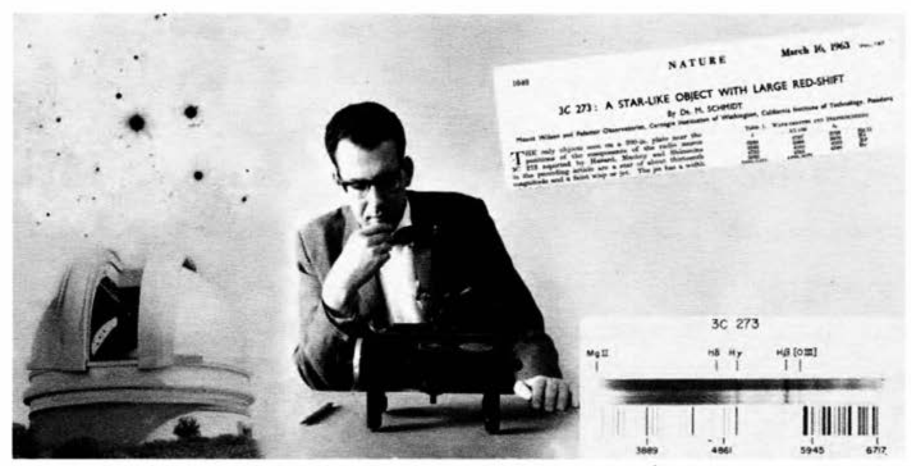
عندما نشر علماء الفلك الراديوي في كامبردج فهرسهم الثالث للنجوم في عام ١٩٥٩، استهدف علماء الفلك البصري مصادر الانبعاث الراديوي الأكثر انضغاطًا، والتي قدمت أفضل فرصة للعثور على نظير بصري.[٢٢] وكما حدث من قبل، كان علماء الفلك من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في مركز الحدث؛ حيث رصد توم ماثيوز وألان سانديج الجرم ٤٨ في الفهرس «ثري سي ٤٨» (3C48)، ووجدا جرمًا أزرق باهتًا في هذا الموقع الراديوي، محاطًا بسحابة سديمية. كان ضوؤه يتغير بسرعة، ولم يكن من الممكن أن يكون هذا الجرم أكبر بكثير من نجم. ولكن كان الأمر الأكثر إثارة للحيرة هو الطيف؛ فقد كانت له خطوط انبعاث قوية وعريضة لا يمكن تحديدها بأي عنصر معروف. عرض ماثيوز هذا الطيف على جيسي جرينستين في القاعة، لكن جرينستين – خبير في النجوم – لم يكن قد شاهد طيفًا نجميًّا مثله من قبل. وبما أنه كان عاجزًا عن تفسير هذه البيانات، فقد وضع جرينستين الطيف في درج ونسي أمره.

وقعت على مارتن شميدت مسئولية القيام بالخطوة التالية، فقد التحق الفلكي الهولندي الشاب بمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا لدراسة تشكيل النجوم في المجرَّات، ولكنه ما لبث أن شغف بمصادر الانبعاث الراديوي. وفي عام ١٩٦٣ استغل علماء الفلك الراديوي في أستراليا تسبب القمر في خسوف الجرم «ثري سي ٢٧٣» في قياس الموقع الدقيق للمصدر. ذهب شميدت إلى التلسكوب البالغ قطره ٢٠٠ بوصة وشاهد جسمًا أزرق شبيهًا بالنجوم مع ملمح خطي يميل بعيدًا عن المركز. وأظهر طيف هذا الجرم خطوط انبعاث غامضة مثل تلك التي شوهدت للجرم 3C48. عندما حاول شميدت مطابقة نمط الخطوط مع عنصر معروف جيدًا، أدرك أن هذا الملمح كان خطوطًا للهيدروجين منزاحة بنسبة ١٦٪ نحو الأحمر. وبما أن الانزياح نحو الأحمر ناتج عن التوسع الكوني، فإن هذا الجرم كان يبتعد عنَّا بسرعة مذهلة تبلغ ١٠٠ مليون ميل في الساعة. بعدها نُشِرَت أربعة أبحاث كلاسيكية تصف اكتشاف شميدت في مجلة نيتشر.[٢٣]

وبعد مرور خمسين سنة، قال عن لحظة الاكتشاف هذه: «فسرتُ ذلك فورًا على أنه انزياح كوني نحو الأحمر وذلك لأن الجرم كان شديد السطوع في السماء، واتضح أن السطوع كان عاليًا جدًّا. كان ذلك رائعًا؛ لأنه كان أكثر سطوعًا من المجرَّات العادية بل وحتى أكبر المجرَّات، هكذا وجدنا أمامنا في الكون شيئًا أكثر سطوعًا من مجرَّة بأكملها، ويبدو كأنه نجم. لقد كانت تجربة مدهشة»، (شكل ٢١).[٢٤]

مستلهمًا فكرة شميدت، قام جرينستين بإخراج الطيف السابق للجرم "3C48" وسرعان ما طابق خطوط الانبعاث بخطوط لعناصر طبيعية بانزياح نحو الأحمر يبلغ أكثر من ضعفي ذلك، أي بنسبة ٣٧٪.[٢٥] كان الجرم «ثري سي ٢٧٣» على بُعد ٢ مليار سنة ضوئية، وكان الجرم «ثري سي ٤٨» على بُعد ٤٫٥ مليار سنة ضوئية، وقد انبعث ضوء هذا الجرم الثاني عندما كانت الأرض تتشكل، وكان يسافر عبر الفضاء منذ ذلك الحين. كانت كلا الجرمين ينبعث منه ١٠٠ ضعف لضوء مجرَّة بأكملها، ومع ذلك فإن حجم الواحد منهما لا يتجاوز النظام الشمسي. صاغ مارتن شميدت مصطلحًا جديدًا لهذه الفئة غير العادية من الأجرام، وهو «مصدر راديوي شبه نجمي» أو «كوازار».

بما أن العمل الرئيسي قد تم في لوس أنجلوس (بعد أن اعتُبِرَت باسادينا امتدادًا للوس أنجلوس منذ فترة طويلة)، فلنستخدم مدينة لوس أنجلوس الكبرى كمقياس تمثيلي. تخيَّل أنك تحلق عاليًا فوق لوس أنجلوس ليلًا بطائرة مروحية، وفي المدينة



شكل ٢١: صورة مركبة أُنشئت من أجل ندوة لإحياء الذكرى السنوية الخمسين لاكتشاف مارتن شميدت للكوازارات. على اليسار: تلسكوب مرصد بالومار البالغ قطره ٢٠٠ بوصة وصورة الكوازار «ثري سي ٢٧٣». وفي الوسط: مارتن شميدت يتفقَّد الطيف الذي سجله التلسكوب. وعلى اليمين: طيف الكوازار، مع رسم خطوط الانبعاثات في الأعلى والأطوال الموجية في الأسفل، إضافة إلى صفحة العنوان من البحث الذي أعلن عن الاكتشاف.
«جورج دجورجوفسكي/معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا»

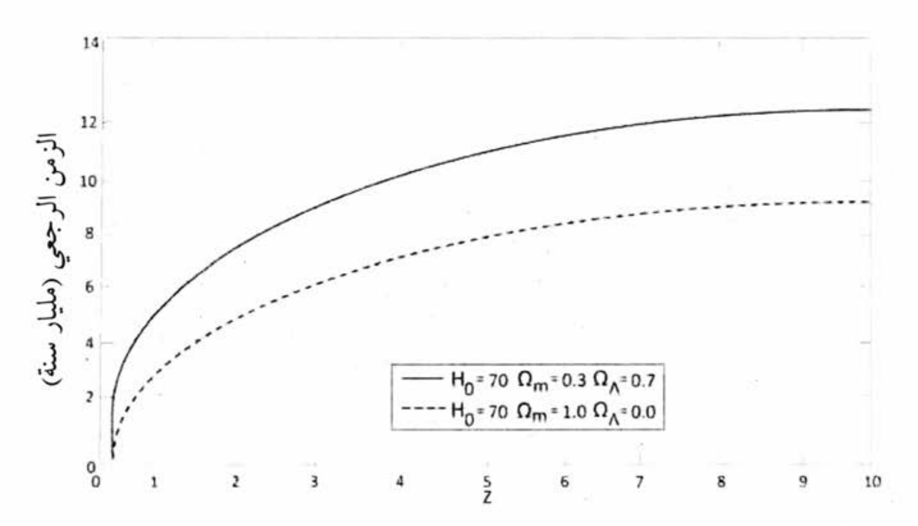
التي يبلغ عدد سكانها حوالي ١٠ ملايين نسمة، يوجد ما يقرب من عشرة مصابيح موزعة بين المنازل والشوارع والسيارات لكل نسمة، أي ما مجموعه ١٠٠ مليون مصباح (أقوم بتقريب هذه الأرقام إلى أقرب قيمة أُسيَّة للتبسيط). لو كانت لوس أنجلوس مجرَّة، فإن كل ضوء سيمثل حوالي ألف نجم. تخيَّل الآن أنه في وسط مدينة لوس أنجلوس، يوجد مصدر ضوئي أحادي النقطة يُصدر إضاءة أعلى بعدة مئات من المرات من المدينة بأكملها، إلا أن حجمه لا يتجاوز بضع بوصات، فلا يزيد عن أي مصباح فردي. لو استطعنا أن نرتفع عاليًا فوق الأرض، بحيث تكون المدينة على بُعد آلاف الأميال أسفلنا، فإن مصدر الضوء المركزي المكثف سيظل مرئيًّا لفترة طويلة بعد أن تختفي الأضواء الفردية عن الرؤية. من على بُعد مسافة هائلة في الكون، يمكن أن تكون المجرَّة صغيرة جدًّا وتصعب رؤيتها، ولكن لبَّها الساطع يضيء بتألق، هذا هو الكوازار.

علماء الفلك يحصدون نقاط الضوء البعيدة

إن الخاصية الأكثر إثارة للانتباه عند الكوازارات هي الانزياح الشديد نحو الأحمر، والتي تشير إلى المسافات البعيدة والإضاءة العالية. إن تمدد الكون يطيل أطوال موجات الفوتونات التي تنتقل عبره، ويسمى ذلك التأثير «الانزياح الكوني نحو الأحمر».[٢٦] إن الانزياح الأحمر، والذي يُكتب z، يعرف بالعلاقة $1+z = R_0/R_e$، حيث R_0 هو حجم الكون (أو المسافة بين أي نقطتين في الفضاء) عندما يُرصد الضوء الصادر من جرم ما، و R_e هو حجم الكون (أو المسافة بين أي نقطتين في الفضاء لأن كل الفضاء يتمدد بالمعدل نفسه)، عند انبعاث الضوء نفسه. وهذه بالضبط العلاقة الرياضية للإشعاع ذاتها، $1+z = \lambda_0/\lambda_e$، حيث λ_0 هو الطول الموجي المتمدد أو المنزاح نحو الأحمر للفوتون الذي نرصده الآن بواسطة تلسكوب، و λ_e هو طول موجة ذلك الفوتون عند انبعاثه بداية.

كلما كانت المجرَّة أبعد كان ابتعادها أسرع، بل في الواقع إن كل مجرَّة تبتعد عن مثيلاتها.[٢٧] تلك الملاحظة التي قدمها إدوين هابل في عام ١٩٢٩ أدت إلى فكرة الكون المتمدد. عندما يكون الانزياح نحو الأحمر قليلًا، يكون مساويًا تقريبًا لسرعة التباعد كجزء من سرعة الضوء.[٢٨] قبل اكتشاف الكوازارات كان أكثر الأجرام السماوية المعروفة بُعدًا هو مجرَّة موجودة في «عنقود هيدرا المجري»، بانزياح نحو الأحمر قدره $z = 0.2$. وفي غضون عامين رفع مارتن شميدت الرقم القياسي للانزياح نحو الأحمر إلى $z = 2.0$ مع الكوازار «ثري سي ٩»،[٢٩] الذي يبتعد بنسبة ٨٠٪ من سرعة الضوء. والضوء الذي نراه الآن انبعث عندما كان الكون في ربع عمره الحالي (شكل ٢٢). وبما أن الضوء البعيد ضوء قديم، يستخدم الفلكيون الأجسام البعيدة كآلات زمن؛ فالكوازارات هي بمنزلة مسبار لدراسة الكون البعيد والقديم.

كان رصد الكوازارات عملًا شاقًّا في تلك الأيام الأولى، فقد كان على علماء الفلك الراديوي بذل جهود حثيثة من أجل الوصول إلى مواقع دقيقة. كان يوم العمل العادي في التلسكوب يتكون من نوبتين تمتد كل منهما اثنتي عشرة ساعة، حيث يمكن رصد الموجات الراديوية ليلًا أو نهارًا على حد سواء. وكان لا بد من فحص متاهة الوصلات الكهربائية في غرفة التحكم ثم فحصها مرة أخرى. وكانت المقابس توصِل إشارات تلسكوبات مختلفة أو أجزاء المصفوفة إلى مجمِّع الإشارات، ولا يمكن



شكل ٢٢: إن الضوء البعيد ضوء قديم، ويحدث الانزياح نحو الأحمر بسبب تمدد الكون، وأوضح هابل أن الانزياح نحو الأحمر يتزايد مع بُعد المسافة عن مجرَّة درب التبانة. ويبين الرسم البياني العلاقة بين الانزياح نحو الأحمر، أو التغير الكسري في الطول الموجي بسبب تحرك الضوء في الكون المتمدد، والزمن الرجعي، أو طول الفترة التي انقضت بعد انبعاث الضوء. يبلغ عمر الكون ١٣,٨ مليار سنة، وكان ضوء الكوازارات يسافر عبر الفضاء لجزء كبير من عمر الكون. وتظهر النواة الصلبة النموذج الزمني المتفق عليه حاليًا.

«كريس إمبي»

إلا لخبير أن يتتبع هذه الشبكة من الوصلات التي تشبه مكرونة الإسباجيتي. كانت هذه الأيام هي الأيام الأولى للحوسبة؛ لذا كانت الإشارات تُسجَّل بطريقة تناظرية على شريط مغناطيسي. وكانت مراقبة الشريط وإضافة أشرطة جديدة وظيفة بدوام كامل، من أجل التأكد من عدم نفاد الأشرطة. ثم بعد ذلك كانت الإشارات تُغذَّى في حاسوب مركزي على بطاقات مثقبة، من أجل مراقبة القوة المتغيرة للإشارة الراديوية أثناء تحرك المصدر عبر السماء ودمجها مع قراءات دقيقة للساعة من أجل حساب الموقع. كان حساب موقع واحد دقيق يتطلب عدة أيام وكثير من عمليات المسح للسماء.

كانت حياة عالم الفلك البصري أسهل قليلًا وأكثر روعة، فقد كان يدلف إلى قفص الرصد في التلسكوب الكبير، معلقًا فوق مرآة سطحية كأنه ذبابة عالقة في شبكة معدنية. وتطل فتحة قفص الرصد على حقول النجم المتلألئة. وكان يأخذ معه لوحات فوتوغرافية مغلقة في القفص، ومغلفة في صندوق لا يدخله الضوء، وتنقل بعناية إلى

الكاميرا حيث تتعرض إلى سماء الليل. ثم يستخدم أزرارًا على لوحة صغيرة لإجراء تعديلات دقيقة على المعدل الذي يتبعه التلسكوب عبر السماء، وذلك لضمان أن تكون الصور واضحة قدر الإمكان. إنها حياة مليئة بالروعة والسحر، ولكن يشوبها الملل أيضًا. وفي فصل الشتاء، ليسن هناك سوى الليالي الباردة الممتدة لاثنتي عشرة ساعة، ولا يوجد كثير ممَّا يُفعل سوى الضغط على الأزرار الموجهة كل بضع ثوانٍ وتغيير اللوحات الفوتوغرافية كل بضع ساعات. وربما يضطر علماء الفلك البصري إلى قضاء ليلة كاملة في تلسكوب لقياس الانزياح نحو الأحمر لجرم واحد.

بعد فهرسة بضع عشرات من الكوازارات، لاحظ الفلكيون أن الكوازارات أكثر زُرقة (أي أكثر سخونة) من أي نجم. وأدرك العديد من الباحثين أن هناك أجرامًا أخرى شبيهة بالنجوم على الدرجة نفسها من الزرقة لا ترتبط بأي مصدر راديوي. وكشفت الأطياف أن العديد من هذه الأجرام الزرقاء لها انزياح عالٍ نحو الأحمر؛ كانت هذه الأجرام كوازارات أيضًا. وبسبب الحماس نحو هذا الاكتشاف، أجرى علماء الفلك عمليات مسح تصويرية لمساحات شاسعة من السماء من أجل «حصاد» الأجرام ذات اللون الأزرق، وكانت هذه الطريقة فعالة للغاية؛ إذ فاق عدد الكوازارات المكتشفة بهذه الطريقة عدد الكوازارات ذات الانبعاث الراديوي القوي بعشرات الأضعاف.

بين الحين والآخر، كان التنافس في اصطياد الكوازارات يتحول إلى ضغائن، ففي عام ١٩٦٥ كتب ألان سانديج - من معهد كارنيجي - ورقة بحثية حول فئة جديدة من الكوازارات الهادئة راديويًّا، وكانت سمعته الحسنة سببًا في قيام محرر دورية «أستروفيزيكال جورنال» بنشر الورقة البحثية دون أن يراجعها أي علماء أنداد له. وكان من جرَّاء هذا أن استشاط فريتز زفيكي - من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا - غضبًا؛ لأنه كان قد اكتشف سابقًا مجرَّات صغيرة لها خصائص الكوازار. وبعد بضع سنوات كتب في مقدمة ناقدة في كتابه عن خصائص المجرَّات الغريبة قائلًا: «على الرغم من معرفته بكل هذه الحقائق في عام ١٩٦٤، قام سانديج بواحد من أكثر أعمال الغش فجاجة من خلال الإعلان عن وجود مكون رئيسي جديد في الكون، ألا وهي المجرَّات الشبيهة بالنجوم. لم يكن اكتشاف سانديج الذي هزَّ أرجاء الأرض يتعدى إعادة تسمية المجرَّات المدمجة بأن أطلق عليها اسم «المجرَّات المتطفلة» و«المجرَّات الشبيهة بالنجوم»، وهو الأمر الذي جعله يلعب دور المتطفل بنفسه».[٣٠] ثم يعد نفسه منتميًا للأوساط الأكاديمية المهذبة.

أنتجت المنافسة بين معهد كارنيجي ومعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا العديد من المشاريع الطموحة التي تقود علم الفلك البصري في القرن الحادي والعشرين. في البداية، أنشأ معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا مرصد كيك ذا التلسكوبين التوأم بقطر ١٠ أمتار في هاواي، في حين بنى معهد كارنيجي توأم مرصد ماجلان بقطر ٦٫٥ أمتار في شيلي. وأصبح معهد كارنيجي الآن شريكًا رئيسيًّا في تلسكوب ماجلان العملاق الذي يبلغ قطره ٢٢٫٥ مترًا، كما أن معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا شريك رئيسي الآن في التلسكوب المزمع إنشاؤه والذي يبلغ قطره ٣٠ مترًا.[٣١] وهذان مشروعان بمليارات الدولارات مع شركاء دوليين، فبينما يسعى علماء الفلك لجني المزيد من نقاط الضوء البعيدة، تصبح «ألعابهم» أكثر تعقيدًا وأكثر كُلفة.

تعكف جامعة أريزونا حاليًّا على صنع مرايا لتلسكوب ماجلان العملاق. في كل عام أو نحو ذلك، أقوم بزيارة ذلك المرفق الكائن تحت ملعب كرة القدم والذي يتم فيه وضع عشرين طنًّا من قطع الزجاج النقي الصغيرة في حوض يبلغ قطره ٣٠ قدمًا، وتُسخن إلى ١١٧٠ درجة مئوية، وتصاغ في شكل قطع مكافئ. عندما يدور فرن المرآة الضخم، مع الأضواء الوامضة وموجات الحرارة التي تتدفق منه، يشبه هذا العجلة الدوارة في الملاهي، ويشبه المهندسون الواقفين إلى جواره بمعاطفهم البيضاء ونظارات الحماية، العلماء المجانين. وبعد ثلاثة أشهر، عندما تبرد المرآة بالكامل، تُصقل بصورة شبه مثالية. يعتريني الذهول عندما أفكر فيما لو زيدت مساحة تلك المرآة إلى مساحة الولايات الأمريكية المتجاورة، حينها لن تصل أكبر تموجاتها أو عيوبها إلى بوصة واحدة. ويستخدم تلسكوب ماجلان العملاق سبع مرايا كبيرة، تتراص ست منها مثل بتلات الزهور حول عنصر مركزي. بينما سيتم بناء التلسكوب ذي القطر ٣٠ مترًا بمرايا سداسية يبلغ عددها ٤٩٢، وسيبلغ قطر كلٍّ منها خمسة أقدام. ويتسابق كلا المشروعين لكي يكون أكبر تلسكوب في العالم. وسوف يقضي كلٌّ منهما جزءًا كبيرًا من وقته في دراسة الكوازارات.

فرضية وجود الثقوب السوداء فائقة الضخامة

حتى قبل اكتشاف الكوازارات كانت هناك أسباب للاعتقاد بأن شيئًا غير عادي كان يحدث في مركز بعض المجرَّات. وفي عام ١٩٥٩ أظهرت عملية حسابية أن

خطوط الانبعاث العريضة في مجرَّات سيفرت يمكن تفسيرها من خلال جاذبية ناتجة عن جسم مدمج أكبر من الشمس بمليار مرة. وقد وصف المنظِّر الإنجليزي جيف بوربيدج بإيجاز هذا التحدي المتعلق بالمجرَّات الراديوية قائلًا: إن الطاقة التي تحتويها في المجالات المغناطيسية والجسيمات النسبوية تتطلب التحول الكامل لما يصل إلى ١٠٠ مليون كتلة شمسية إلى طاقة.[٣٢] والجسيمات النسبوية هي جسيمات تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء. اقترح المُنظِّر الأرمني فيكتور أمبارتسوميان «تغييرًا جذريًّا في مفهوم نُوى المجرَّات»، قائلًا: «يجب أن نرفض فكرة أن نُوى المجرَّات تتكون من نجوم فقط».[٣٣]

لقد صارت الفرضيات تلاحق بعضها بعضًا كما لو كانت في دوامة، ربما كانت الطاقة ناتجة عن انفجارات في عنقود نجمي كثيف، حيث يقوم مستعر أعظم بإطلاق نظرائه في تفاعل متسلسل. وربما يمكن للعنقود النجمي أن يتطور إلى كثافة عالية للغاية من خلال التصادمات التي تطرح كميات كبيرة من الغاز. وربما جاءت الطاقة من نجم واحد فائق الكتلة. بعد ذلك، وفي غضون عام من اكتشاف شميدت المثير، اقترح اثنان من المُنظِّرين فرضية أن مصدر قوة الكوازار كان من جرَّاء إلقاء الكتلة على ثقب أسود فائق الضخامة.[٣٤] فقد أدركا أن عمليات الاندماج النجمي كانت غير كافية تمامًا لتوليد قوة الكوازار. فلا بد من وجود مُحرِّك جاذبية. ومع الدوران الحلزوني للكتلة في المدار الداخلي الثابت لثقب أسود فائق الضخامة، يمكن تحويل الكتلة إلى جسيمات وطاقة إشعاعية بكفاءة تقترب من ١٠٪. وحتى بهذه الكفاءة فإن الكوازارات الأكثر إضاءة ستحتاج إلى ثقوب سوداء تزيد كتلتها عن مليار كتلة شمسية لتزويدها بالطاقة.

لم يتقبل مجتمع الفيزياء الفلكية على الفور الثقوب السوداء فائقة الضخامة. تذكَّر أن عام ١٩٦٤ كان العام الذي صيغ فيه مصطلح «الثقب الأسود» ورُصد فيه «الدجاجة إكس-١» لأول مرة. كانت فكرة الثقوب السوداء ذات الكتل النجمية لا تزال جديدة، ولكن هنا كان المُنظِّران يقترحان وجود ثقوب سوداء أكبر من تلك بمليار مرة! لقد بدت تلك وقتها تكهنات مغرقة في الخيال. هل يمكنك تخيُّل بلوغ الفارق مليار ضعف؟ إنه الفرق بين ذرة رمل واحدة وصندوق رمل ممتلئ. إنه كالفرق بين امتلاك ما يكفي من المال لشراء شطيرة برجر، وكونك أغنى شخص في العالم. إنه كالفرق بين كتلة الأشخاص الموجودين في أسرتك وكتلة جبل إيفرست. حتى إن علماء الفيزياء الفلكية المخضرمين تفاجأوا بفكرة وجود ثقوب سوداء ضخمة كالمجرَّات الصغيرة.

تعتمد متطلبات الطاقة القصوى للكوازارات على حقيقة أنها تبعد مسافات هائلة عن الأرض، وبالتالي يجب أن يكون سطوعها شديدًا جدًّا لتكون لامعة كما نراها. واللمعان هو سطوع ذاتي، أو يمثل عدد الفوتونات التي يبعثها المصدر كل ثانية. ولو لم تكن الكوازارات على المسافات التي يشير إليها انزياحها نحو الأحمر، لكانت متطلبات الطاقة هذه أقل، هكذا يسير المنطق. يبدو المصباح الكهربائي بقدرة ١٠٠ وات على مسافة ١٠٠ متر باهتًا، ولكن إذا كان المصباح على بُعد ١٠٠ كيلومتر فعليًّا، فإنه يجب أن يكون أكثر لمعانًا بمليون مرة لكي يظهر لك بهذا السطوع نفسه، ممَّا يجعله مصباحًا بقدرة ١٠٠ ميجاوات. الكوازارات باهتة ولكنها بعيدة جدًّا - على بُعد مليارات السنين الضوئية - لدرجة أنه ينبغي أن تكون مضيئة على نحو مذهل.

هذه المسألة دفعت مجموعة صغيرة - ولكن مؤثرة - من علماء الفلك تضمنت بعض أسماء تحظى باحترام كبير، إلى التشكيك في الطبيعة الكونية للانزياح نحو الأحمر الخاص بالكوازار.[٣٥] يُترجَم الانزياح الكوني نحو الأحمر في نموذج الكون المتمدد إلى مسافة. أشار هؤلاء الفلكيون إلى أماكن شوهدت فيها الكوازارات بالقرب من مجرَّات لها انزياح نحو الأحمر بقدر أقل بكثير، ويوجد الكثير من هذه الحالات أكثر ممَّا ينبغي أن يوجد بالصدفة، وقد لاحظوا وجود زيادة في حالات انزياح نحو الأحمر محددة ليس لها أي تفسير في التفسير الكوني. لم تكن هذه الادعاءات الإحصائية مقنعة بالنسبة إلى معظم علماء الفلك، ولكن الحُجج المستندة إلى فيزياء كثافة الطاقة كانت أكثر إثارة للقلق. دافع الفيزيائيون عن فكرة أن الكوازارات ينبغي أن «تختنق» بإشعاعاتها وتنطفئ قبل أن تتمكن من الإضاءة بهذا السطوع. كانت الكوازارات ذات التغير الراديوي السريع مدمجة للغاية لدرجة أنه عندما تبعث الإلكترونات النسبية الفوتونات الراديوية، فإنها ستصدم تلك الفوتونات وتعززها إلى ترددات أشعة ضوئية، ثم أشعة سينية، ثم أشعة جاما. وستؤدي النتيجة إلى تدمير المصدر الراديوي وتحويله إلى مصدر لأشعة جاما. وفي منتصف ستينيات القرن العشرين احتدمت العديد من النقاشات الساخنة بشأن هذا الموضوع في المؤتمرات، دون التوصل إلى توافق بشأنه. وتطلب الأمر عمليات رصد راديوية جديدة أفضل من أجل إحراز تقدم في هذا الصدد.

رسم خرائط النفاثات والفصوص الراديوية

يمكن أن نصفح عن علماء الفلك الراديوي لشعورهم بشيء من الغضب؛ فقد

قدموا أول دليل على وجود طاقات هائلة في نُوى المجرَّة والمواقع الدقيقة التي سمحت باكتشاف الكوازارات. لكن لا يمكن فهم الكوازارات دون قياس الانزياح نحو الأحمر، والذي يتطلب طيفًا ضوئيًّا، واتضح أن معظم الكوازارات لها انبعاثات راديوية ضعيفة. لقد بدا أن كل العمل المهم يتم في علم الفلك البصري.

لكن علماء الفلك الراديوي كان لديهم حيلة أخرى؛ ففي مرحلة اكتشاف الكوازارات استخدموا أطباقًا تفصلها مئات الأمتار لجعل الأخطاء في تحديد الموقع لا تزيد عن نحو دقيقة قوسية واحدة. ومع ذلك، من خلال زيادة الفصل في مقياس تداخل إلى كيلومتر واحد وباستخدام طول موجي قصير قدر الإمكان، وصلوا إلى دقة تبلغ ثانية قوسية، وهي القيمة القريبة من دقة الموقع البصري. فأصبح بإمكانهم رسم خريطة للسماء الراديوية بدقة تضاهي دقة علماء الفلك البصريين. وعند رؤية هذه الخرائط بهذه الدرجة من التفاصيل، كانت المصادر الراديوية متنوعة بشكل مثير للدهشة. كانت هناك مجرَّات راديوية، بينما كان نظيرها البصري مجرَّة واحدة، وكان هناك كوازارات، بينما كان نظيرها البصري شبه نجم واحد. وكان نوع المصادر الراديوية الأكثر شيوعًا يمتلك فصوصًا ضخمة من البث الراديوي تمتد عبر مجرَّة بيضاوية ذات انبعاث راديوي في قلبها، وفي بعض الحالات كانت الفصوص تمتد لعدة ملايين من السنين الضوئية في الفضاء بين المجرَّات.[٣٦] وغالبًا ما كانت مورفولوجيا المجرَّة غريبة أو مضطربة؛ إذ كان يبدو أن دفقات من الجسيمات عالية الطاقة تنبعث من مركز المجرَّة، وتغذي الإشعاع الراديوي في الفصوص المزدوجة. ويعد جرم «الدجاجة إيه» مثالًا رائعًا على ذلك.[٣٧]

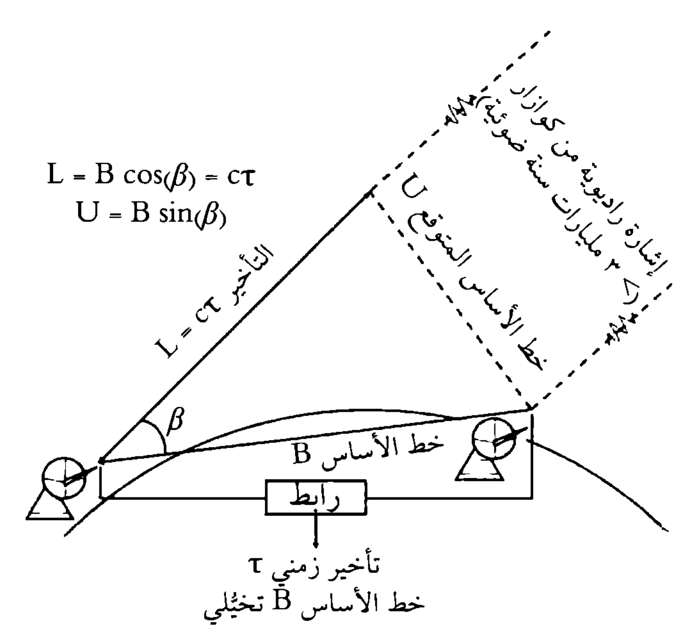
لقد قابلنا مجرَّات لها خصائص مثيرة وغريبة؛ فبعضها يمتلك انبعاثات راديوية قوية، وبعضها الآخر يمتلك انبعاثات أشعة سينية قوية، وغيرها يمتلك انبعاثات بصرية مكثفة وغازًا يتحرك بسرعة بالقرب من مراكزها. ولا شيء في هذا السلوك يحدث في مجرَّة تتكون ببساطة من مجموعة كبيرة من النجوم. ويستخدم علماء الفلك مصطلح «المجرَّات النشطة» للإشارة بشكل جمعي إلى المجرَّات التي تكون فيها المناطق النووية نشطة بشكل خاص.

لأنني فلكي بصري، فإنني أُفضِّل عمومًا البيانات التي أستطيع رؤيتها، ولكن لكي أفهم المجرَّات النشطة، استخدمت «مصفوفة المراصد الكبيرة» الموجودة في نيو مكسيكو، حيث عملت في غرفة التحكم نفسها التي تلقت فيها جودي فوستر رسالة

من الكائنات الفضائية في فيلم «اتصال» (Contact). ومصفوفة المراصد الكبيرة هي عبارة عن مجموعة من ٢٧ طبقًا يبلغ قطر كلٍّ منها ٢٥ مترًا يمكن ترتيبها على شكل حرف "Y" على مساحة ٢٥ ميلًا. وتتحرك هذه الأطباق على مسارات من السكك الحديدية لزيادة المسافات الفاصلة بينها أو تقليلها. لقد استغرقت بعض الوقت حتى أعتاد مفردات رطانة علم الفلك الراديوي. ورغم أن علماء الفلك الراديوي المحليين قد ساعدوني في اختزال بياناتي، فإنني لاحظت أنهم يحبون إبقاء هالة من الغموض حول موضوع دراستهم؛ فقد كنت في أحسن الأحوال عضوًا فخريًّا وسط هذه المجموعة.

أولى علماء الفلك الراديوي اهتمامًا خاصًّا للمصادر الراديوية التي لم يُحلُّ غموضها بواسطة مقاييس التداخل الموجودة، التي أشار التغير فيها إلى أن المصدر لم يكن أكبر بكثير من نظامنا الشمسي. ففي ستينيات القرن العشرين شرعوا في صنع تلسكوب راديوي بحجم الأرض. كان عليهم أن يكتشفوا طريقة مختلفة لجمع الإشارات من التلسكوبات المختلفة؛ لأن وصلات الكابلات وموجات الميكروويف لن تعمل على نطاق عابر للقارات. تمثلت طريقتهم في تسجيل الإشارة من كل تلسكوب على شريط مغناطيسي، مع تسجيل الوقت بواسطة ساعة ذرية، ثم تجميع الأشرطة فيما بعد لتكوين هدب التداخل ثم في النهاية رسم خريطة. كان اختزال البيانات أمرًا شاقًّا يعتمد على تطور الساعات الذرية والحواسيب ومسجلات الأشرطة المغناطيسية. وفي عام ١٩٦٧ رصدت مجموعات في الولايات المتحدة وكندا عدة مصادر على مسافة ٢٠٠ كيلومتر. وفي غضون عام أضافوا على نحو متزايد هوائيات بعيدة في بورتوريكو والسويد وأستراليا. وارتفعت خطوط الأساس إلى ١٠٠٠٠ كيلومتر، أو ٨٠٪ من قطر الأرض. وتحسنت الدقة الزاوية بعامل ١٠٠٠، حيث بلغت واحدًا على ألف من الثانية القوسية، وهي التي تساوي الدقة الزاوية لعملة معدنية موضوعة فوق برج إيفل كما تُرى من مدينة نيويورك (شكل ٢٣). يستطيع علماء الفلك الراديوي الآن إنتاج صور أكثر وضوحًا من صور علماء الفلك البصري.

سُميت هذه التقنية الجديدة «القياس بالتداخل ذو خط القاعدة الطويل» (VLBI). في عام ١٩٧٠ لاحظ علماء الفلك الراديوي الذين يدرسون الكوازارات باستخدام هذه التقنية، أن أكثر المصادر الراديوية المدمجة تمتلك نفاثة في اتجاه واحد فقط، وكان يوجد في الغالب «فقاعات» أو نقاط ساخنة داخل النفاثات. ومن خلال البيانات التي تم جمعها على مدى عام، استطاعوا رؤية الفقاعات تتحرك بعيدًا عن النواة. يعتاد الفلكيون



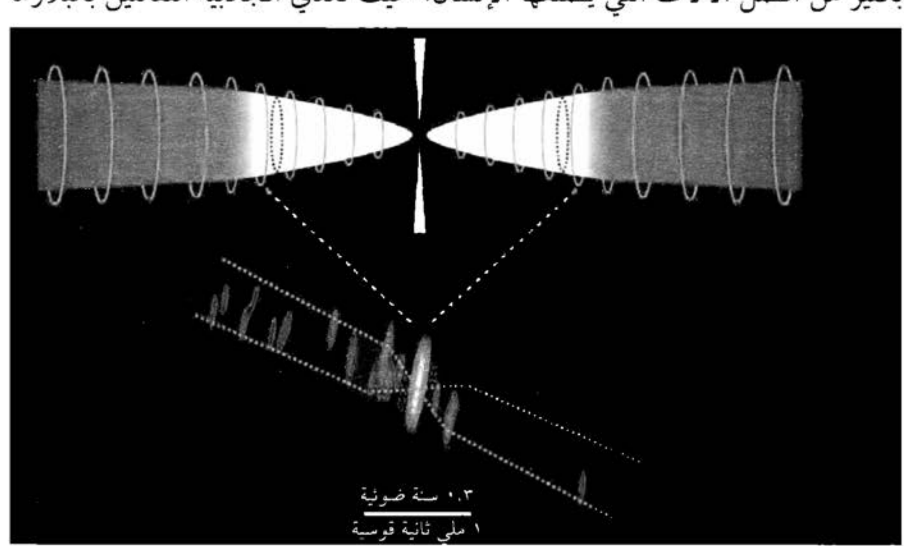
شكل ٢٣: القياس بالتداخل ذو خط القاعدة الطويل (VLBI)، هو الطريقة التي يتم من خلالها الجمع بين إشارات التلسكوبات الراديوية المنفصلة على نطاق واسع لمحاكاة الدقة الزاوية العالية للغاية لتلسكوب بحجم يضاهي الحد الأقصى للمسافة الفاصلة بين التلسكوبات. يصل الضوء من كوازار بعيد في أوقات مختلفة قليلًا عند تلسكوبين مع تأخير زمني يُحسب من خلال الهندسة البسيطة، وتُجمع الإشارات الراديوية المنفصلة من خلال قطعة إلكترونية تسمى الرابط.

«كريس إمبي»

على الفترات الزمنية الطويلة في الكون خارج المجرَّة، حيث تستغرق المجرَّة مئات الملايين من السنين للدوران مرة واحدة؛ لذلك كان من الممتع رؤية تغييرات تحدث من سنة إلى أخرى.[٣٨] ولكن عندما حولوا الحركة المستعرضة الواضحة للفقاعات إلى سرعة، أصيبوا بصدمة؛ حيث كانت سرعات الفصل من ٥ إلى ١٠ أضعاف لسرعة الضوء. هل كان هذا انتهاكًا للنسبية؟ لا، كان مجرد وهمًا بصريًّا. نظرًا لأن النفاثة في المصادر الراديوية المدمجة تتجه نحونا تقريبًا، وبما أن الفقاعات تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فربما يبدو أنها تتحرك حركة مستعرضة سريعة جدًّا. هذا يشبه شخصًا على الأرض يستخدم شعاع ضوء قويًّا لتحريك بقعة من الضوء عبر سطح القمر. وإذا دار شعاع الضوء حول محوره بسرعة كافية، يمكن لشخص ما على القمر

أن يرى البقعة وكأنها تتحرك أسرع من الضوء على الرغم من أن الفوتونات في شعاع الضوء تنتقل بسرعة الضوء وليس أسرع من ذلك. هذه الظاهرة التي تدعى «الحركة المفرطة اللمعية»، شوهدت في عشرات المصادر الراديوية المدمجة.

أظهرت الخرائط الرائعة للمصادر الراديوية أن علماء الفلك الراديوي يمكنهم صنع صور جميلة مثل صور علم الفلك البصري (شكل ٢٤).[٣٩] تدعم البيانات فرضية وجود الثقوب السوداء فائقة الضخامة، وتعني الانبعاثات الراديوية القوية أن ثمة مُسرِّع جسيمات يعمل، والدمج يعني أن الإشعاع يأتي من منطقة صغيرة في الفضاء. ولا يستطيع أن يفعل ذلك سوى محرك جاذبية مثل ثقب أسود. وكذلك بما أن المجرَّات لها زخم زاوي وأنه ينبغي أن يدور جسم مدمج في مركز المجرَّة، فإن الغاز سيهرب على طول محور الدوران. يمكن أن يكون الثقب الأسود مسرعًا للجسيمات أقوى بكثير من أفضل الآلات التي يصنعها الإنسان؛ حيث تغذي الجاذبية النفاثتين بالبلازما



شكل ٢٤: بيانات من المجرَّة النشطة «إن جي سي ١٠٥٢» (NGC 1052) من مقياس تداخل راديوي يعمل بأطوال موجية ملليمترية (في الأسفل)، مع رسم تخطيطي للنفاثتين الأفقيتين وقطاع عرضي للقرص المزود العمودي (في الأعلى). ويساعد المجال المغناطيسي في الحفاظ على اصطفاف النفاثتين ويغذيهما بالطاقة، وتسمح هذه البيانات بقياس شدة المجال بالقرب من أفق حدث الثقب الأسود المركزي.

«آن كاترين باكزكو/إيه آند إيه، المجلد ٥٩٣، ص A٢٧، ٢٠١٦، منشورة بإذن/حقوق الطبع والنشر المرصد الأوروبي الجنوبي»

الممغنطة التي تنطلق من مكان وجودها بالقرب من الثقب الأسود بسرعة تقارب سرعة الضوء، وتمتد إلى ما بعد حافة المجرَّة لتضيء الليل الراديوي.

حديقة حيوانات المجرَّات النشطة

في حكاية الفيل والعميان الرمزية، يقوم مجموعة من العميان بلمس فيل ليعرف شكله كلٌّ على حدة، ويشرع في وصفه، فيلمس أحدهم ساقه ويقول هو كالعمود، ويلمس آخر ذيله ويقول هو كالحبل، ويلمس ثالث الأذن ويقول هو كسعفة النخيل، بينما يمسك رابع بنابه ويقول إنه يشبه الأنبوب (شكل ٢٥). توضح هذه الحكاية أخطار الاستدلال من خلال معلومات غير كاملة. وعلى ذكر الحيوانات، دعنا نلقِ نظرة على «حديقة حيوانات» المجرَّات النشطة.



شكل ٢٥: في هذه الصورة اليابانية التي تعود إلى القرن التاسع عشر، يفحص مجموعة من الرجال المكفوفين فيلًا، ويصل كلٌّ منهم إلى استنتاج مختلف فيما يتعلق بطبيعة هذا الحيوان. هذه الصورة بمثابة استعارة في العلوم تدل على مخاطر المعلومات غير المكتملة، وتدل في علم الفلك على صعوبة الجمع بين معلومات منفردة من أجزاء من الطيف الكهرومغناطيسي. «إيتشو هانابوسا»

تُعرَّف المجرَّات النشطة بواسطة من خلال أثرها السلبي فهي تُظهِر سلوكًا نشطًا لا يمكن تفسيره من خلال النجوم أو العمليات النجمية. بدأ هذا الموضوع بالمجرَّات الحلزونية التي اكتشفها سيفرت عام ١٩٤٣. وكانت نواتها الزرقاء الساطعة وخطوط انبعاثها العريضة تشير إلى أن الغاز يتحرك بسرعة كبيرة بحيث يتعذر تفسيره بواسطة نمط الدوران الطبيعي للمجرَّة.[٤٠] لكن لاحقًا فهمنا أن مجرَّات سيفرت هي «الحلقة المفقودة» بين المجرَّات العادية والكوازارات؛ لأن لها انبعاثات لا حرارية ولكنها أقرب من الكوازارات وأقل منها سطوعًا. لكن ولأن مجرَّات سيفرت قد نُسِيَت لعدة عقود، بدت الكوازارات اكتشافًا غير مسبوق. وباستخدام تلسكوب هابل الفضائي، صوَّر علماء الفلك صورًا متعمقة وأوضحوا أن «الضباب» المحيط بالكوازارات كان في الواقع ضوءًا آتيًا من مجرَّة بعيدة. وبطريقة تذكِّرنا بتشبيه لوس أنجلوس في الليل، أظهر هذا أن مصدر ضوء الكوازار يعيش بالفعل في مدينة من النجوم.[٤١]

لكن لم تكن تلك المحاولة الوحيدة لتصنيف الأنواع المختلفة للمصادر الراديوية. تحتوي المجرَّات الراديوية ذات السطوع المنخفض على نُوى ونفاثتين تنتهي عادة داخل المجرَّة في صورة فصوص انبعاث غير منتظمة. أما المجرَّات الراديوية ذات السطوع العالي فتحتوي على نُوى ونفاثة أحادية الجانب تمتد لفصوص أبعد من المجرَّة المضيفة. المصادر الراديوية ذات النُوى الأقوى هي كوازارات تتسم بسطوع راديوي وبصري سريع التغير وكثافة طاقة عالية للغاية. وكانت أكثر أنواعها الأكثر تطرُّفًا على الإطلاق تسمى «بلازار» (أو نجم زائف متوهج). وكما تشير هذه التسمية، فإن لها صور سطوع هائلة، وتتغير أحيانًا من دقيقة إلى دقيقة. وتتوافق خصائصها مع المواقف التي ننظر فيها إلى أسفل نفاثة جسيمات نسبية باتجاه المحرك المركزي: الثقب الأسود فائق الضخامة.[٤٢]

منذ عدة عقود، ذهبتُ إلى روسيا للبحث عن البلازارات، لكنني حصلتُ على أكثر ممَّا كنت أتوقع، لقد مرَّت عليَّ أوقات شعرت فيها أن هذه الرحلة تبدو كما لو كانت جزءًا من رواية تجسس، بدأت مخاوفي عندما ركب رجلان قويا البنية في المقعد الخلفي للسيارة على جانبي، وكانا يحملان أسلحتهما. لكن حياة فلكي المراصد ليست عادة حافلة بأحداث مثل هذه، كنا متجهين لعبور الحدود إلى مصنع للمثلجات في جورجيا لشراء الثلج الجاف من أجل تبريد الأداة التي أحضرناها من الولايات المتحدة.

كنا قد وصلنا إلى التلسكوب الروسي الذي يبلغ قطره ٦ أمتار - والذي كان

التلسكوب الأكبر في العالم - لدراسة أندر وحش في حديقة الحيوانات الكائنة خارج المجرَّة. كان الضوء الصادر عن البلازار يستطيع تغيير سطوع مجرَّة بأكملها بمقدار ١٠٠ مرة في أقل من ساعة، وكانت أداتنا عبارة عن مقياس ضوئي يمكنه قياس سطوع مصدر إشعاع بعيد في أقل من ثانية. وكنا نأمل في الحصول على نظرة لا يعوقها عائق إلى دوامة تقع بالقرب من ثقب أسود فائق الضخامة. وكان شريكي في الجريمة سانتياجو تابيا، وهو عالم فلك تشيلي التقيتُ به في أريزونا. كان مضيفونا هم موظفو المرصد، والذين كانوا علماء كبار يحملون شهادات دكتوراه ويتقاضون أقل من ١٠٠ دولار شهريًّا، ويكافحون لشراء الملابس وإطعام أسرهم. ومقارنة بهم، كنت غنيًّا، بالنسبة لباحث شاب في مرحلة ما بعد الدكتوراه يعمل في أمريكا.

تلك كانت روسيا في آخر أيام الاتحاد السوفيتي، كانت منهكة يضرب الانحلال جميع أرجائها، ففي لينينجراد رأينا الأرفف فارغة في الأسواق والصفوف الطويلة أما مطاعم قليلة، وأثناء رحلتي إلى القوقاز - حيث يوجد التلسكوب - والتي استغرقت ثلاثة أيام، اقتحم الجنود القطار ملوحين ببنادق كلاشينكوف بحثًا عن مجموعات اللصوص. وكان من سذاجتي أن ذهبت في رحلة مشيًا على الأقدام في منطقة أعلى وادي أحد الأنهار في اليوم التالي للوصول. وفي ذلك المساء، وبينما كنا نأكل مرق البنجر الروسي والخبز الكثيف مع مضيفينا، قالوا إنني يجب أن أكون حذرًا لأن مُهربي الأسلحة الجورجيين يستخدمون هذه الوديان، ولا يمكن التنبؤ بأفعالهم.

جمعنا البيانات بالطريقة الصعبة؛ إذ تناوبت أنا وسانتياجو على استخدام قفص الرصد، وهو أسطوانة معدنية في أعلى التلسكوب يصل إليها الضوء مُركَّزًا بعد انعكاسه عن المرآة الأساسية. كما احتوى القفص أيضًا على المقياس الضوئي الذي أحضرناه معنا من الولايات المتحدة. لم يكن القفص مبطنًا، وعلى الرغم من تعدد طبقات ملابسي الشتوية، فقد كنت أتجمد بردًا في نهاية كل ليلة من ليالي شهر فبراير الطويلة. ولكن الأمر لم يخلو من لحظات بهجة؛ ففي إحدى الليالي الصافية، نشط هدفنا فجأة وسجل عداد الفوتونات الخاص بالأداة ضوءه يرتفع وينخفض. تخيلتُ أن نجمًا تمزَّق إربًا عندما اصطدم بالقرص المزود وأصبح وقودًا لهذا الوحش. وفي نهاية الليلة، جلسنا مع مضيفينا الروس وأكلنا «كافيار الفقراء»، المصنوع من الخضراوات المخللة المهروسة. وشربنا زجاجة كاملة من الفودكا الخام وأخذنا نقصُّ القصص حتى ارتفعت الشمس الحمراء المنتفخة فوق القوقاز.

تنشأ «مشكلة الفيل» لدى المجرَّات النشطة بسبب الرؤية الانتقائية. فإذا نظرت باستخدام الأدوات الراديوية، سترى نواة ونفاثات وفصوصًا، في حين أن غالبية المجرَّات النشطة صامتة راديويًّا. وإذا نظرت بأدوات بصرية، فسترى خطوط انبعاث عريضة ونواة ساطعة مع مجرَّة مضيفة خافتة تحيط بها، لكنك ستغفل عن ظاهرة النفاثة. ولا يستطيع أي شِقٍّ من هذين الشقين للطيف الكهرومغناطيسي سرد القصة بأكملها؛ لذلك نحن بحاجة إلى طرق أخرى للنظر.

كما رأينا، أدى علم فلك الأشعة السينية إلى اكتشاف الثقب الأسود النموذجي «الدجاجة إكس-١» عام ١٩٦٤. وبعد ست سنوات رصد صاروخ الأشعة السينية من مجرَّتين نشطتين قريبتين، وهما «قنطورس أ» (Centaurus A) و«إم ٨٧» (M87)، والكوازار "3C273".[٤٣] وفي سبعينيات القرن العشرين، كان لدى مرصد أينشتاين المداري الحساسية اللازمة لرصد أعداد كبيرة من الكوازارات. وكانت الأشعة السينية المنبعثة منها متغيرة، ممَّا يدل على أنها جاءت من نقطة قريبة من المحرك المركزي. وبدا انبعاث الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية للعديد من الكوازارات كإشعاع حراري من غاز عند درجة حرارة ١٠٠ ألف كلفن. والمثير للإعجاب أنها تطابقت مع نماذج القرص المزود الذي يحيط بثقب أسود فائق الضخامة.[٤٤]

في كل مرة كان علماء الفلك يفتحون نافذة جديدة ذات طول موجي جديد، كانوا حينها يرصدون مجرَّات نشطة. اكتشف القمر الصناعي الفلكي (IRAS) الذي يعمل بالأشعة تحت الحمراء، والذي تم إطلاقه في عام ١٩٧٧، أن الكوازارات كانت مصادر قوية للأشعة تحت الحمراء. كان الحدس يشير إلى أن الإشعاع ذا الطول الموجي القصير الذي نشأ بالقرب من النواة قد تمت إعادة معالجته بواسطة حبيبات الغبار البعيدة وتحويله إلى أشعة تحت حمراء ذات طول موجي أطول.[٤٥] وخلال تسعينيات القرن العشرين، أضاف مرصد كومبتون لأشعة جاما التابع لناسا نافذة عالية الطاقة على المجرَّات النشطة. والنفاثتان اللتان تنبثقان من قطبي الثقب الأسود قادرتان على إنتاج كمية كبيرة من أشعة جاما. وقد رُصدت بعض المجرَّات النشطة بعامل مذهل قدره ١٠٠ مليون تريليون (١٠^٢٠) في الطول الموجي، يتراوح ما بين طول يساوي مترًا إلى طول موجي أصغر من نواة الذرة. وفي عام ٢٠١٨، فُتحت نافذة جديدة مذهلة على المجرَّات النشطة عندما رُصد نيوترينو من بلازار يبعد ٤ مليارات سنة ضوئية. وحتى ذلك الحين لم تُرصد النيوترينوات إلا من الشمس ومن المستعرات العظمى القريبة

نسبيًّا. صُنع هذا النيوترينو بالقرب من الثقب الأسود فائق الضخامة في مركز البلازار ورُصد بعد ٤ مليارات سنة عن طريق مصفوفة تلسكوب مدفونة في جليد القطب الجنوبي.[٤٦]

يمكن أن تتفاقم مشكلة الفيل بسبب الشوفينية تجاه الطول الموجي. فعلماء الفلك لا يتخصصون فقط في الأشياء التي يهتمون بدراستها ولكن أيضًا في طرق الرصد. يتبع علماء الفلك البصريون - الذين لا يزالون يمثلون غالبية علماء الفلك - المسار الكلاسيكي لموضوع الدراسة، بدءًا من الرؤية بالعين المجردة حتى الصور الفوتوغرافية وانتهاءً بجهاز اقتران الشحنات. أما علماء الفلك الراديوي، فغالبًا ما يأتون من خلفية هندسية، وغالبًا ما يأتي علماء فلك الأشعة تحت الحمراء والأشعة السينية من خلفية فيزيائية. وبخلاف الفروق التقنية، هناك ملمح «قبلي» للفلكيين الذين يعملون بأطوال موجية مختلفة؛ ففي بعض الأحيان لا يتحدثون معًا عندما ينبغي أن يفعلوا.

هي قضية تتعلق بالمنظور

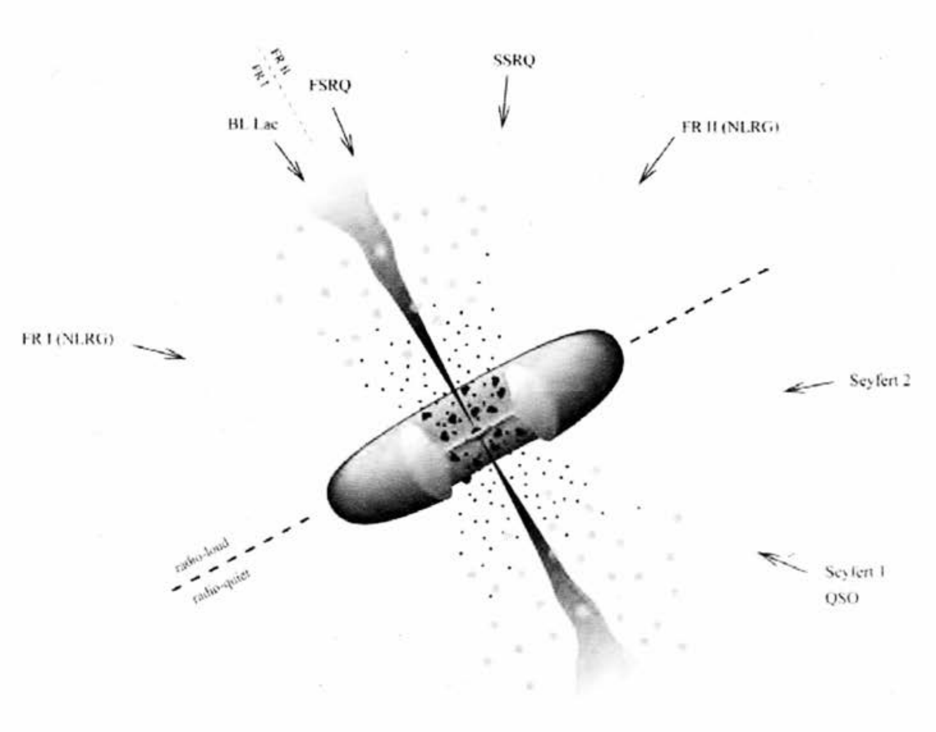
يحاول علماء الفلك توحيد الأنواع المختلفة في «حديقة حيوان» المجرَّات النشطة، من خلال افتراض أن مظهرها يعتمد على اتجاه وضعها. فيتم تسطيح المجرَّات الحلزونية وتصبح الأقراص المزودة رفيعة، ومن ثَمَّ فمن المتوقع أن تعتمد خصائص المجرَّات النشطة على اتجاه وضعها في الفضاء. وبتشبيه بسيط، نقول إن للكرة دائمًا شكلاً دائريًّا بغض النظر عن اتجاهها، في حين أن القرص الرقيق قد يبدو كدائرة أو شكل بيضاوي أو حتى خطٍّ وفقًا لطريقة تموضعه.

أدرك علماء الفلك الراديوي أن الاختلاف في السطوع الراديوي بين الكوازارات قد لا يكون بسبب الاختلافات الجوهرية في السطوع، فإذا وُجِّهت النفاثات التي تسرع الجسيمات إلى سرعة الضوء تقريبًا بالقرب من خط الرؤية، فسيتم تعزيز انبعاثها كثيرًا. والرؤية المباشرة على طول محور قطبي الثقب الأسود فائق الضخامة ستظهر نواة راديوية قوية، ونفاثة من جانب واحد، وربما هالة ضعيفة من الانبعاثات الراديوية الممتدة. هذه هي البلازارات المتغيرة بسرعة والتي تشكل جزءًا صغيرًا من إجمالي عدد البلازارات، نظرًا لأن هذا الاتجاه مميز للغاية.[٤٧] والنظرة الجانبية لهذا المصدر نفسه تبين نواة ضعيفة ونفاثتين وفصين ممتدين على كلا الجانبين.[٤٨]

عملتُ على البلازارات من أجل أطروحتي للدكتوراه، وبعدها لعقد كامل من الزمن، وكانت جاذبيتها كجاذبية سيارة رياضية لدى الشباب، سريعة ورائعة وقادرة بالقدر نفسه على منحك رحلة مثيرة. لا يمكن التنبؤ بالبلازارات؛ لأن انبعاثها يعتمد على الفيزياء الفلكية المتغيرة بالقرب من الثقب الأسود فائق الضخامة. ففي بعض الأحيان كنت أتوجه إلى التلسكوب وكانت جميع أهدافي المفضلة تقريبًا تُظهِر نفسها، بينما كان البعض أكثر خفوتًا من أن يُرصَد. ولكن عندما حالفني الحظ، أعطتني البلازارات مكافأة بأن أدخلتني «كتاب جينيس للأرقام القياسية». وفي وقت آخر، كنت أرصد مجرَّات نشطة ذات سطوع أعلى، وتباينات أسرع، وانبعاثات أكثر ضغطًا، واستقطاب أعلى. يحدث الاستقطاب عندما تكون الاهتزازات المرتبطة بالإشعاع الكهرومغناطيسي في مستوى واحد، ويوفر استقطاب الضوء معلومات عن الصورة الهندسية لمصدر الضوء.

ومع ذلك، يتطلب العلم الجيد نهجًا تحليليًّا وعمليات رصد منهجية. ومن ثَمَّ فإن تقدم الأبحاث يحدث من خلال إجمالي البيانات وليس بلحظات الإثارة وحدها، تعلمت أن البلازارات تمثل مشهدًا مميزًا للغاية على المحرك المركزي. ويشير الغاز الساخن الذي يتحرك بنسبة ٩٩٪ من سرعة الضوء إلى أن البلازارات أكثر سطوعًا من أي مجرَّة نشطة بمئات المرات عندما لا ينظر المرء على طول النفاثة. كان تسريع الغاز إلى هذه السرعة تحديًا نظريًّا، لكن الراصدين مثلي يستمتعون بإرهاق المُنظِّرين. كان من الممكن في نهاية المطاف تحديد المجرَّات النشطة الأكثر وفرة والتي كان سلوكها أقل إثارة، للتدليل المشهد الذي نغفله عندما لا ننظر إلى أسفل النفاثة. لم يكن هدفي وصف البلازارات كوحوش فريدة وغريبة، وإنما منحها مكانًا طبيعيًّا داخل «حديقة حيوان» المجرَّات النشطة.

تجمعت هذه الأفكار معًا في نموذج موحَّد للنُوى المجرِّية النشطة (AGN). الفكرة الأساسية هنا هي أن جميع المجرَّات النشطة تعمل بواسطة قرص مزود فوق ثقب أسود فائق الضخامة، وأن الاختلافات المرصودة ناتجة في الغالب – ولكن ليس كليًّا – عن اتجاه خط الرؤية (شكل ٢٦). وتتأثر الخصائص المرصودة بشدة بالتعتيم وبكون الغاز الموجود في النفاثة يتحرك بسرعة تقترب من سرعة الضوء. كما تعتمد الخصائص الجوهرية للنواة على نوع المجرَّة المضيفة، ودوران الثقب الأسود، ومعدل تراكم القرص المزود.[٤٩] بغض النظر عن مدى التباين الذي يتبدى عليه مظهره فإن الفيل هو حيوان واحد.



شكل ٢٦: في هذا النموذج الموحَّد للنُّوى المجرَّية النشطة (AGN)، يمكن اعتبار «حديقة حيوان» للنُّوى المجرية النشطة على أنها نسخ مختلفة من فكرة أساسية. تأتي الطاقة من القرص المزود الكائن فوق ثقب مركزي أسود فائق الضخامة، ولكن ما يراه الراصدون يعتمد على خط الرؤية بالنسبة للقرص المزود الداخلي، وحلقة الغبار الأكبر، والنفاثتين النسبيتين المزدوجتين. وحول الحافة كُتبت أسماء حيوانات «حديقة الحيوان» التي نرصدها. وأنواع النُّوى المجريَّة النشطة على غرار مجرَّات سيفرت، والمجرَّات الراديوية، والبلازارات، تعد واحدة بشكل أساسي. ويوضح هذا النموذج العديد من الاختلافات بين المجرَّات النشطة وليس كلها.

«ناسا/مركز جودارد لرحلات الفضاء/تلسكوب فيرمي الفضائي لأشعة جاما»

الفصل الرابع
محركات الجاذبية

غيَّر اكتشاف المجرَّات النشطة من وجه علم الفلك؛ فقبل هذا كان هناك اعتقاد سائد بأن الكون مصنوع من النجوم والغاز، والتي تتجمع بفعل الجاذبية لتكوين المجرَّات، وكانت المجرَّات تتباعد بصمت بينما يتمدد الكون. ولكن معرفة أن المناطق النووية في بعض المجرَّات تضخ كميات هائلة من الطاقة عبر الطيف الكهرومغناطيسي بأكمله قد غيَّر فهمنا لبنية المجرَّة. كما أثار هذا الاكتشاف أيضًا بعض الأسئلة على غرار: كيف يتشكل الثقب الأسود فائق الضخامة وينمو في وسط المجرَّة؟ ما الدليل على أن قوة الجاذبية يمكن أن تخلق ظواهر مذهلة مثل الكوازارات؟

جاءت الإجابات الأولى من مكان مفاجئ، ألا وهو مركز مجرتنا.

خلاصة القول إن الثقوب السوداء مُحركات جاذبية، حيث تحول طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة إشعاعية. أو بعبارة أخرى نقول تستخدم الثقوب السوداء المادة لصنع الضوء. فعندما تتسارع المادة نحو أفق الحدث، تصدر إشعاعات كهرومغناطيسية عالية الطاقة. وتعد كفاءة هذه العملية أعلى بعشرات المرات من الاندماج النووي الذي يمثل وقودًا للنجوم مثل الشمس. ومن المفارقات أن هذه الأجسام الفلكية المظلمة جوهريًا يمكن أن تكون الأكثر سطوعًا بالنسبة إلى كتلتها في الكون.

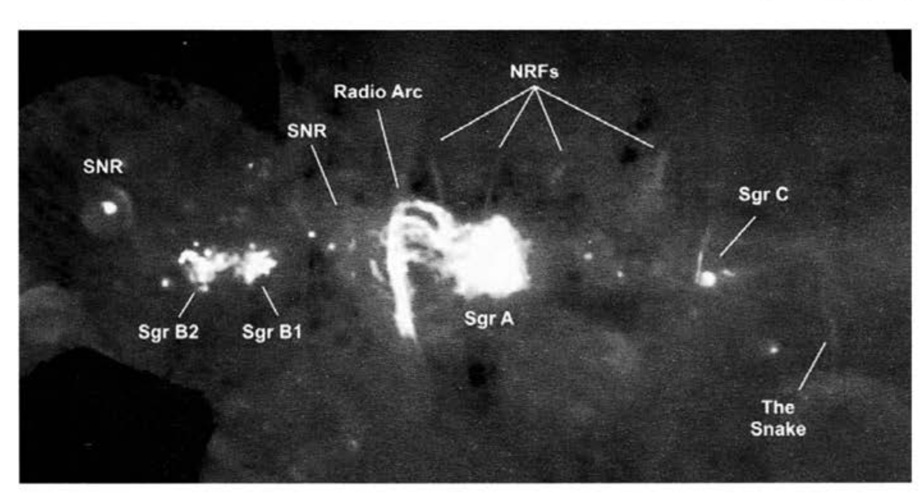
الثقب الأسود الكبير المجاور لنا

كان زيوس ماجنًا؛ إذ كان يتزاوج مع الربات والبشر على السواء. وُلِدَ ابنه هرقل لإنسيَّة فانية، لكنه ترك الطفل يرضع حليب زوجته الإلهة هيرا أثناء نومها. فاستشاطت هيرا غضبًا عندما استيقظت وسحبت ثديها من بين شفتي الرضيع، فانتشر الحليب عبر السماء. ومن هنا فإننا نُسمي زمرة الأضواء المتناثرة التي تميز نظامنا النجمي باسم درب التبانة أو الطريق اللبني، أو Galaxy (أي مجرَّة)، من الكلمة اليونانية التي تعني حليب.[1]

منذ أكثر من ٤٠٠ عام عندما وجَّه جاليليو تلسكوبه البدائي نحو الضوء الرقيق الصادر من درب التبانة، رأى أنها تنقسم إلى عدد لا يحصى من النجوم الخافتة، ولكننا نعلم الآن أن هذا التوزيع العشوائي للنجوم في درب التبانة سببه الغبار الذي يحول ضوء النجوم إلى اللون الأحمر ويخفيه، وأن تلك البقع الداكنة ليست أماكن خالية من النجوم، إنما هي أماكن نجومها محجوبة. والضوء الذي يسافر إلينا من وسط المجرَّة على بُعد حوالي ٢٧ ألف سنة ضوئية يُحجب بالكامل تقريبًا.[2] ولا يستطيع الوصول إلينا سوى فوتون واحد فقط من كل تريليون فوتون؛ لهذا حبذا لو كنا ننظر عبر باب مغلق.

أوضح كارل جانسكي - مؤسس علم الفلك الراديوي - في عام ١٩٣٣ أن الانبعاثات الراديوية من مجرَّة درب التبانة تبلغ ذروتها عند كوكبة القوس، وهو ما تطابق مع ملاحظة ويليام هيرشل أن كوكبة القوس كانت تضم القطاع الأكثر كثافة في «مدينة نجومنا». لا تتأثر الموجات الراديوية بالغبار، لكن الهوائي الراديوي البسيط الذي صنعه جانسكي لم يستطع تحديد موقع بث هذه الموجات الراديوية بدقة شديدة. في عام ١٩٧٤ استخدم بروس بالِك وروبرت براون طريقة القياس بالتداخل ذي خط القاعدة الطويل لإظهار أن مصدر الإشعاع الراديوي في وسط مجرتنا جرم صغير جدًّا.[3] وتكشف عمليات الرصد الأكثر حداثة أنه أكثر المصادر الراديوية اندماجًا في السماء (شكل ٢٧). وهذا المصدر لا يشبه المصدرين الآخرين اللذين تم رصدهما في عمليات المسح الأولى. تتسم منطقة «القوس أ*» أو «الرامي أ*» (Sagittarius A*) بسطوع راديويٍّ مماثلٍ لسطوع «العذراء أ» و«الدجاجة أ»، لكن «العذراء أ» (M87) عبارة عن مجرَّة إهليلجية نشطة تقع على مسافة ٥٤ مليون سنة ضوئية، بينما «الدجاجة أ» عبارة عن مجرَّة مشوَّهة تقع على بُعد ٧٥٠ مليون سنة ضوئية. ويعد مركز درب

التبانة أقل قوة بملايين المرات من هاتين المجرتين الراديويتين النموذجيتين؛ لذلك يبدو أنها ظاهرة مختلفة.



شكل ٢٧: إن مركز درب التبانة يعد غامضًا بالنسبة إلى الضوء المرئي، ولكن يمكن للموجات الراديوية أن تنتقل بحُريَّة عبر المجرَّة. تُظهر هذه الخريطة الراديوية المنطقة الواقعة على بُعد بضع مئات من السنين الضوئية من مركز المجرَّة، وتمثل المناطق الأكثر سطوعًا الانبعاثات الراديوية الأكثر كثافة. بعض السمات المحددة هنا تمثل خيوط راديوية غير حرارية (NRF) وبقايا مستعرات عظمى (SNR). في وسط المنطقة، يوجد «القوس أ*» (Sgr A)، والذي يعد أقوى المصادر الراديوية المعروفة، وقد اكتشفه كارل جانسكي عام ١٩٣٢.
«إف. يوسف زاده/المرصد الفلكي الراديوي الوطني/شركة أسوشياتد يونيفرسيتيز/مؤسسة العلوم الوطنية»

أي نوع من المصادر الراديوية يمكن أن يكون ضعيفًا لهذه الدرجة؟ في عام ١٩٧٤ ألمح مارتن ريس — العالم المُنظِّر الشاب بجامعة كامبريدج - إلى إجابة هذه السؤال في ورقة بحثية عن الثقوب السوداء التي تم التغاضي عنها في ذلك الوقت.[٤] وأشار إلى أن الثقب الأسود فائق الضخامة قد يكون مظلمًا لأنه لا يجذب أي مادة، وكان أول مَن اقترح أنه يمكن رصده من خلال تأثيره على النجوم التي تدور بالقرب منه.

استغرقت التكنولوجيا بعض الوقت لتحقيق هذه الفكرة؛ حيث تمثلت المشكلة الأولى في الغبار الموجود بيننا وبين مركز المجرَّة، فجزيئات الغبار تمتص الضوء وتنثره بكفاءة، لكنها تتفاعل بدرجة أقل بكثير مع الفوتونات ذات الطول الموجي

الأطول. ومن خلال تحويل انتباهنا من الضوء المرئي عند ٠٫٥ ميكرون إلى طيف الأشعة تحت الحمراء القريب عند ٢ ميكرون، انخفض التعتيم باتجاه مركز المجرَّة من معامل يبلغ تريليون إلى معامل يبلغ ٢٠، وهذا أقرب إلى النظر عبر زجاج داكن اللون بدلًا من النظر عبر باب مغلق. خرجت أجهز الرصد بالأشعة تحت الحمراء لأول مرة من مختبرات الفيزياء في سبعينيات القرن العشرين، ولكن كان لديها عنصر واحد فقط أو «بكسل»؛ لذا فإن صنع صورة يعني مسح التلسكوب على نحو مرهق في نمط شبكي. وعلى غرار السيارات الرياضية الإيطالية، كانت أجهزة الرصد هذه باهظة الثمن وحساسة وعرضة للكسر، وبحلول منتصف تسعينيات القرن العشرين، استُخدمت أول مصفوفة بقوة ميجابكسل، ونضج علم فلك الأشعة تحت الحمراء الرقمي بطريقة نضوج علم الفلك البصري نفسها قبل خمسة عشر عامًا.[٥]

كانت المشكلة الثانية هي الكثافة العالية للنجوم، والتي تسببت في تداخل الصور وتداخل المساحات اللونية في تفاصيل الصور.[٦] دعنا نتخيل الحالة الفيزيائية، يوجد ١٠ ملايين نجم على بُعد بضع سنوات ضوئية من مركز درب التبانة، وهذه كثافة أعلى بخمسين مليون مرة من كثافة المنطقة المجاورة للشمس. فإذا عشنا هناك، سيكون مشهد سماء الليل مذهلاً؛ إذ سينير ضوء المليون نجم بسطوع أكبر بمئات المرات من القمر البدر، لدرجة أنك ستستطيع أن تقرأ صحيفة على ضوء النجوم فقط. من ناحية أخرى، سيكون من شبه المستحيل القيام بأعمال علم الفلك البصري في مثل هذه البيئة، والأسوأ من ذلك هو أن الحياة على أي كوكب ستواجه مصاعب؛ إذ ستكون انفجارات المستعرات العظمى متكررة، وربما تكون قريبة بما يكفي لتدمير جميع أشكال الحياة. وسيتداخل التفاعل المتكرر للنجوم مع الأنظمة الشمسية، مما سيتسبب في قذف الكواكب في الفضاء السحيق. وستضطرب سحب المذنبات في محيط الأنظمة الشمسية، مما يؤدي إلى حدوث تصادمات ومن ثَمَّ انقراضات جماعية بوتيرة أكبر من مثيلتها على الأرض؛ لذا ينبغي أن نشعر بالامتنان لوجودنا في ضاحية درب التبانة الهادئة.

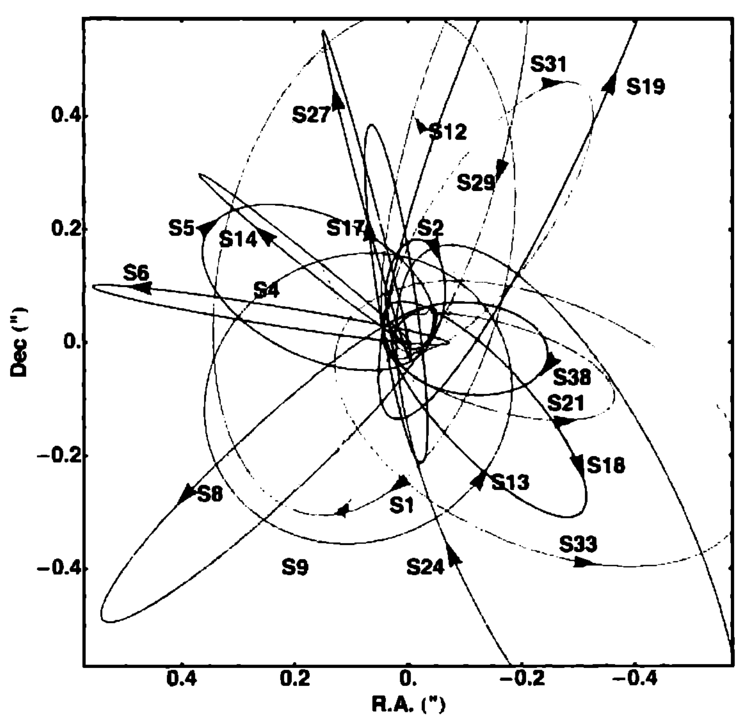
إن تلاقي تقنيتين - مصفوفات أجهزة الرصد بالأشعة تحت الحمراء وتقنيات تحسين الصور الفلكية — قد أوحي بحدوث تجربة مثيرة، حيث يمكن صنع صور لمركز المجرَّة بالأشعة تحت الحمراء بأقصى دقة ممكنة. والبحث عن النجوم التي تبعد بضع سنوات ضوئية عن المصدر الراديوي المدمج، والتي تتحرك بسرعة كافية

بحيث يمكن تتبع حركاتها من سنة إلى أخرى، ثم استخدام مداراتها لاستنتاج الكتلة في المنطقة المركزية لمجرَّتنا.

كانت مجموعة بحثية في معهد ماكس بلانك الكائن بالقرب من ميونيخ هي أول من جرب ذلك، فاستخدمت تلسكوبًا بقطر ٣٫٥ أمتار في تشيلي، مصممًا خصيصًا لصنع صور واضحة. بعد ذلك بعامين بدأت مجموعة أخرى في جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس في تطبيق التجربة نفسها باستخدام تلسكوب كيك الذي تم بناؤه حديثًا في هاواي بقطر يبلغ ١٠ أمتار، وهو الأكبر في العالم. كان على كلتا المجموعتين مكافحة ضبابية الصور بسبب الغلاف الجوي للأرض، إذا نظرت إلى نجم بواسطة تلسكوب في موقع فلكي ممتاز، فسترى لبًّا لامعًا من الضوء يتراقص ويتغير عشوائيًّا، ومحاطًا ببقع من الضوء سريعة الزوال. تنجم هذه البقع عن التباينات السريعة في كثافة الهواء ودرجة الحرارة في الغلاف الجوي العلوي للأرض، والتي تحني أشعة الضوء، وتجعل الصورة ضبابية ومشوشة. واستخدام الصورة ذات التعرض الطويل سيعادل تأثير هذه البقع، مما يجعل النجم يبدو سلسًا ولكن غير واضح. أما الصور ذات التعرض القصير «فتجمد» الغلاف الجوي. ويستطيع الباحثون معالجة هذه الصور وتحويلها وطباعتها لإنشاء صورة أكثر وضوحًا، ومع ذلك فإن هذه الطريقة مملة للغاية؛ إذ يجب تحليل آلاف الصور، والتي تتعرض كلٌّ منها للضوء لبضعة أعشار من الثانية، ثم تُدمج لإنشاء صورة واضحة واحدة.

بعد عدة سنوات من اتباع هذه الطريقة المضنية، عزل الباحثون عشرات النجوم في هذه المنطقة المزدحمة، والتي تم تتبعها بعد ذلك في مداراتها الإهليلجية (شكل ٢٨). ويسهم كل نجم منها في تقدير الكتلة التي تقود حركاتها الجمعية.[٧]

توصلت كلتا مجموعتي الباحثين إلى الاستنتاج المذهل نفسه، والذي مفاده أن بعض النجوم القريبة من مركز المجرَّة كانت تتحرك بسرعة أكبر من ٣٠٠ ألف ميل في الساعة، وكانت الكتلة الضمنية لمساحة بضع سنوات ضوئية عند مركز المجرَّة تساوي ملايين ضعف كتلة الشمس. ولكن لا ينبعث من تلك المنطقة ضوء نجوم يساوي الكمية المناظرة لهذه الكتلة. وحتى فرضية وجود مجموعة كثيفة من النجوم الخافتة لم تفسر إلا نسبة ضئيلة من التركيز الكبير للكتلة في المركز. أشارت الأدلة إلى اتجاه واحد فقط وهي أن جرمًا واحدًا مدمجًا مظلم أكبر بملايين المرات من كتلة الشمس. لقد كان هناك ثقب أسود فائق الضخامة على عتبة بابنا.



شكل ٢٨: تدور الأجرام حول الثقب الأسود فائق الضخامة في مركز درب التبانة، والذي تم قياسه على مدار ستة عشر عامًا باستخدام التصوير بالأشعة تحت الحمراء مع التقنيات البصريات المكيفة لصنع صور شديدة الوضوح. على مسافة ٢٧ ألف سنة ضوئية، تساوي الثانية القوسية الواحدة، والتي تمثل عرض الصورة، ٠٫١ فرسخ فلكي. يمكن استخدام هذه البيانات لاشتقاق مدار كبلري لكل نجم ويتم قياس كتلة الثقب الأسود بشكل موثوق فيه للغاية.

«إس جيلسن/معهد الفيزياء/ إيه بي جيه ٦٩٢، ٢٠٠٩/فريق مركز المجرَّة التابع لمعهد ماكس بلانك لفيزياء خارج الأرض، منسوخة بإذن/حقوق الطبع والنشر لصالح الجمعية الفلكية الأمريكية»

نجوم على حافة الهاوية

كما كتب روبرت فروست: «إننا نرقص في حلقة ونضع افتراضات، ولكن السر يقبع في الوسط ويعرف». إن الطبيعة تحمي أسرارها باستماتة، ويتطلب تسليط الضوء عليها عزمًا وتصميمًا. كان السعي لإثبات أن مجرَّة درب التبانة تحتوي على ثقب أسود فائق الضخامة قد مثَّل واحدة من المنافسات الأكثر حدة في علم الفلك.

على إحدى جبهتي الجدال وقف راينهارد جنزل. كان جنزل رجلًا مشوربًا قوي البنية ذا شعر أحمر وبشرة ضاربة للحمرة، وقد عمل مديرًا لمعهد ماكس بلانك لفيزياء ما هو خارج الأرض في جارشينج بألمانيا. ومن بين أعظم الوظائف في علم الفلك، كان جنزل يشغل واحدة من أفضلها. يتم تعيين مديري معاهد ماكس بلانك المختلفة عن طريق جمعية ماكس بلانك التي تضم النخبة العلمية في ألمانيا، وهم يشغلون مناصبهم هذه مدى الحياة. كما يتمتعون بسلطة عليا ومطلقة ويمكنهم توجيه موارد المؤسسة الكبرى نحو المسائل البحثية التي يختارونها. عُيِّن جنزل مديرًا للمعهد عندما كان في الرابعة والثلاثين من عمره فقط، وكانت مجموعته أول مجموعة تنشر نتائج حول مركز المجرَّة وتدعي وجود كتلة مظلمة مدمجة.

وعلى الجانب الآخر، كانت تقف أندريا جيز ابنة مدينة نيويورك ذات الأصول الإيطالية، وكانت في الرابعة من عمرها عندما أعلنت لأمها أنها تريد أن تكون أول امرأة تطأ قدمها سطح القمر، ولكنها أصبحت عالمة فلك بدلًا من ذلك، وحصلت على درجات علمية من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا ومعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. وعندما بلغت التاسعة والعشرين من عمرها، وبينما كانت أستاذًا مساعدًا في جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس، رصدت مركز المجرَّة لأول مرة، باستخدام تلسكوب كيك في هاواي. ثم عادت إلى مرصد كيك في العام التالي ورأت كيف أن النجوم قد تحركت في وقت قصير: «عندما يوجد ثقب أسود، تتحرك هذه الأجرام كثيرًا. وفي تلك السنة الأولى، استطعنا أن نرى بسهولة أن النجوم قد تحركت، وقد شعرنا بإثارة غامرة. أعتقد أن الإثارة زادت لأن التلسكوب أخفق في العمل في بداية الليلة. لقد كان من الصعب للغاية الحصول على موعد ووقت مخصصين في مرصد كيك، فربما تحصل على بضع ليالٍ فقط في السنة ... وقبل أن ينغلق علينا مركز المجرَّة مباشرة وعندها لن نكون قادرين على رؤيته مرة أخرى، ثم بدأ التلسكوب العمل وحصلنا على الصورة».[8]

أحيانًا تحدث في علم الفلك لحظة اكتشاف، وفي أحيان أخرى يتعين تجميع البيانات بشِقِّ الأنفس على مر السنين، لكي تصل ببطء إلى مستوى الإثبات النهائي. وفي هذه الحالة، عرفت كلتا المجموعتين البحثيتين، اللتين يقودهما على الترتيب عالِم في ذروة قوته[9] وامرأة نجمة صاعدة بسرعة،[10] أين تبحثان عن اكتشافهما، وعرفت كلتاهما بالضبط ما الذي تبحثان عنه. فالنجاح يتطلب مثابرة وتقنية تجريبية دقيقة.

مع بداية الألفية الثالثة، تحولت المجموعة الألمانية من استخدام تلسكوب ذي قطر طوله ٣٫٥ أمتار إلى التلسكوب العظيم (VLT) ذي القطر البالغ طوله ٨٫٢ أمتار، والذي يديره المرصد الأوروبي الجنوبي في تشيلي. وفي منتصف العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بدأت كلتا المجموعتين في استخدام تقنية البصريات المكيفة،[١١] وهي تقنية ابتكارية ضخمة غيَّرت علم الفلك الحديث، وسمحت لعلماء الفلك «بخداع الغلاف الجوي» وصنع صور أكثر وضوحًا وفق حد حيود الضوء الذي يستخدمه التلسكوب الكبير. ومن خلال هذه التقنية يتم التعويض عن ضبابية الصورة وتشوهها الناتجين عن الغلاف الجوي بمرآة ثانوية مرنة، يرتد الضوء الصادر عن ليزر قوي عن الغلاف الجوي العلوي حيث تحدث حركات مضطربة، ويتم قياس الانحرافات الصغيرة في مقدمة موجات الضوء مئات المرات في الثانية الواحدة، ويتم إدخال هذه التصحيحات في مشغلات ميكانيكية متصلة بخلفية المرآة الثانوية.

سمحت البصريات المكيفة للعلماء بتطبيق قوانين كبلر على النجوم المرصودة في مركز المجرَّة، والتي تتحرك كحركة سرب غاضب من النحل. تم تتبع أحد النجوم في مداره الكامل الذي يبلغ ست عشرة سنة.[١٢] وشاهد علماء الفلك نجمًا أو سحابة غاز تتمزق أثناء انحدارها نحو منطقة جاذبية شديدة.[١٣] ويرجح أن المواد التي أكلها الثقب الأسود أدت إلى سلسلة من دفقات الأشعة السينية في عام ٢٠١٤. وباستخدام قوانين كبلر، يستطيع العلماء حساب كتلة الجرم الذي يسبب حركتها، وتسابقت المجموعتان الأمريكية والألمانية على نيل شرف هذا العمل العظيم. وفي غضون ذلك أوضح علماء الفلك الراديوي أن حجم المصدر الراديوي كان صغيرًا ومتوافقًا مع الحجم المتوقع لأفق الحدث.[١٤] وتقدر الكتلة بـ ٤٫٠٢ ملايين ضعف لكتلة الشمس، مع نسبة خطأ قدرها ٤٪ فقط.[١٥] ولأن هذه الحسابات ممكنة الآن، لم يعد الباحثون بحاجة إلى وصف كتاباتهم بعبارات مثل «المرشح» و«الافتراضي»، فقد ثبت وجود ثقب أسود فائق الضخامة بما لا يدعو للشك.

المركز المظلم في كل مجرَّة

إن الكوازارات نادرة للغاية؛ فهي أكثر ندرة بمليون مرة من المجرَّات العادية.[١٦] ففي المتوسط ستحتاج إلى مسح مساحة تبلغ مليار سنة ضوئية في الفضاء على أحد الجوانب للعثور على أحدها. وبمجرد اكتشاف المجرَّات النشطة، تساءل علماء الفلك

عمَّا إذا كانت كل مجرَّة تمر بمرحلة نشطة. كان هناك منظر شاب متقد الذكاء من إنجلترا لديه رؤية مهمة.

كان دونالد ليندن بيل انتقائيًّا فيما يتعلق باهتماماته، فقد عمل على ديناميكا الموائع، والمدارات الإهليلجية في المجرَّات، والسعة الحرارية السلبية، وتأثير الجاذبية الذي يطلق عليه «التمدد العنيف» قبل تحويل انتباهه إلى الكوازارات. في ورقة بحثية استشرافية في عام ١٩٦٩، استنتج ليندن بيل أن الكوازارات تمر بها فترات نشطة ونادرًا ما تكون ساطعة للغاية. وقدَّر أن الكوازارات الميتة ينبغي أن تكون شائعة وأن أقربها ربما يكون على بُعد أقل من ١٠ ملايين سنة ضوئية، أربعة أضعاف المسافة إلى مجرَّة أندروميدا (المرأة المسلسلة، Andromeda وحسب). وأشار إلى أن هذه الكتل المركزية المظلمة ستجمع العديد من النجوم حولها وتكون قابلة للرصد من خلال تأثيرها على تلك النجوم.[١٧]

كنت في الثانية عشرة من عمري عندما نشر ليندن بيل ورقته البحثية؛ لذا لم أقرأها إلا بعد وقت طويل. لكنه أثر في حياتي في ذلك الوقت، كنت أنا وأبي في رحلة بالسيارة إلى جنوب إنجلترا، حيث كنا نزور بعض أقاربنا في هاستنجز، وجلسنا على شاطئ برايتون المفترش بالحصى، ثم توجهنا عبر تلال ساوث داونز إلى قلعة هيرستمونسو، كانت القلعة تكاد تكون نموذجًا أصيلًا لقلاع العصور الوسطى، كانت مبنية بالطوب الأحمر، ويحيط بها خندق مائي. ولكني كنت أكبر سنًّا من أزور مثل تلك القلاع، وأثناء قيامنا بالبحث عن شيء آخر، رأى والدي لافتة تشير إلى المرصد الملكي في جرينتش، والذي كان جزءًا من القلعة، وكانت هناك محاضرة ستبدأ في غضون نصف ساعة.

سار دونالد ليندن بيل بخطى سريعة بجانب المنصة، مطرقًا رأسه في تفكير عميق، في حين جلسنا في مقعدينا، وأدركنا سريعًا أننا تورطنا في شيء كبير، ما انفك ليندن بيل خلال محاضرته يلوح بيديه بشدة، ويلتفت إلى السبورة ويكتب عليها مجموعة كبيرة من المعادلات، كانت المحاضرة تدور حول المجرَّات والثقوب السوداء، وبخلاف المصطلحات الغامضة كانت المحاضرة مليئة بالألغاز.

لم تكن لديَّ أي فكرة عن أي طريق سأسلكه في المستقبل، ومرت عليَّ أوقات فكرت أنني قد أصبح مزارعًا أو مهندسًا معماريًا أو طيارًا. لكن شيئًا ما بشأن هذا المشهد الأكاديمي أصاب فيَّ وترًا حساسًا؛ فمنه علمت أن هناك عددًا لا يحصى من

المجرَّات في الفضاء تنتظر أن يتم قياسها. وقال إن هذه المجرَّات تحتوي على أشياء مظلمة يمكن فهمها بالرياضيات الجميلة. كان يشع إثارة مُعدية مخبرًا من حوله بأن ذاك الكون قابل لسبر أغواره، وهكذا زُرِعَت فيَّ بذرة صغيرة.

كان ليندين بيل يرى أن جميع المجرَّات الضخمة تحتوي على ثقوب سوداء فائقة الضخامة في مركزها، وأن السبب في ندرة الكوازارات هو أنها تقضي جزءًا صغيرًا فقط من حياتها في تجميع الغاز. ولكننا لا نرى سوى ذلك القسم الصغير من حياتها وقت أن تكون «قيد التشغيل»، فمعظمها في سبات، ليس من «غذاء» بالقرب منها، ونبضاتها وعلامات وجودها على قيد الحياة تنخفض إلى مستويات قليلة للغاية.

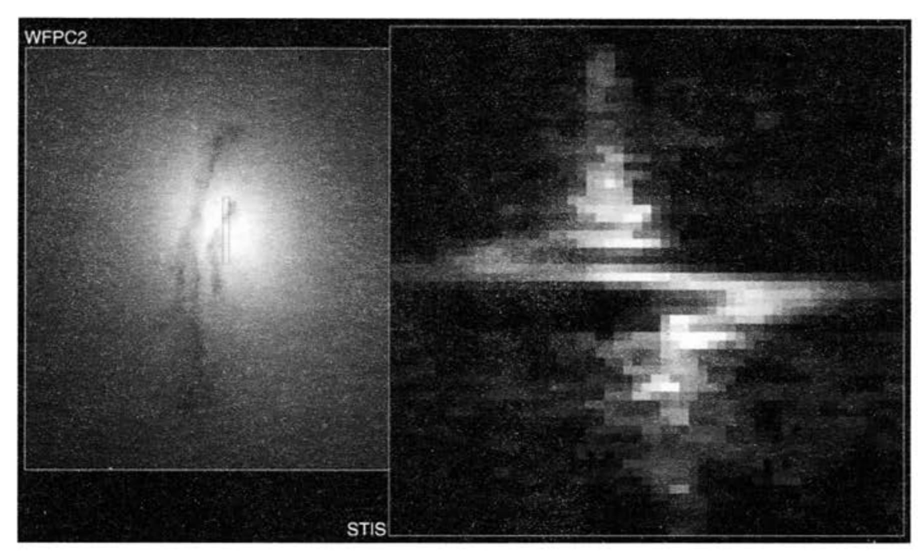
كيف تجد جرمًا مدمجًا وهائلًا ومظلمًا في وسط المجرَّة؟ يعتمد الأمر على القدرة على عزل منطقة مركزية يهيمن فيها الثقب الأسود على الجاذبية، أو ما يعرف بمجال تأثير الجاذبية. فداخل نصف قطر هذا المجال، يتحكم الثقب الأسود في حركات النجوم والغاز. وخارج نصف القطر هذا، تتحكم النجوم بالقرب من مركز المجرَّة في الحركة على نحو رئيسي، ولا يسهم الثقب الأسود في هذا إلا إسهامًا ثانويًّا. وبالنسبة للمجرَّة الكبيرة التي تحتوي على ثقب أسود ضخم تبلغ كتلته ١٠٠ مليون ضعف كتلة الشمس، فإن هذه المسافة تساوي نحو ١٠ فراسخ فلكية أو ٣٣ سنة ضوئية.[١٨] وهذا قريب جدًّا من مركز المجرَّة التي قطرها مائة ألف سنة ضوئية، لو كانت المجرَّة بحجم طبق مائدة، فإن المنطقة التي يهيمن عليها الثقب الأسود ستكون بحجم ذرة من الغبار. وفي مجرَّة بعيدة يكون من الصعب للغاية رصد حركات النجوم أو الغاز وفق هذا المقياس الضئيل.[١٩]

يمكننا أن نحدد عن طريق القياس أن الثقب الأسود الموجود في وسط مجرتنا لا يبعد سوى ٢٧ ألف سنة ضوئية، أي أقرب ١٠٠ مرة من مركز أقرب مجرَّة كبيرة، وهي مجرَّة أندروميدا. يستطيع علماء الفلك دراسة النجوم بمعدل أصغر بمقدار ١٠٠٠ مرة من مجال تأثير الجاذبية، ممَّا يمنحهم فهمًا جيدًا لحساب كتلة الثقب الأسود. وهذا يجعل ذلك «المعيار الذهبي» لرصد الثقب الأسود فائق الضخامة؛ أي تأكيد وجود أحد هذه الثقوب السوداء دون أدنى شك مقبول. لكن العلماء كانوا أيضًا توَّاقين لاصطياد الثقوب السوداء الخاملة الموجودة في مجرَّات أخرى غير مجرتنا، وعلقوا آمالهم على تلسكوب هابل الفضائي.

عندما أُطلق التلسكوب لأول مرة في عام ١٩٩٠، أصيب الجميع بخيبة أمل مريرة. فقد صُمم هذا التلسكوب لالتقاط صور فائقة الوضوح من مدار الأرض، وصُمم لصنع صور أكثر دقة بمقدار ١٠ مرات من دقة أفضل التلسكوبات الأرضية التي كانت موجودة قبله. ولكن عندما وصلت الصور الأولى من تلسكوب هابل الفضائي، أصيب مسئولو ناسا بالحيرة ثم بالخزي؛ حيث أدى خطأ في الاختبار النهائي في المختبر إلى حدوث «زيغ كروي» في المرآة الرئيسية، وهو الأمر الذي يسبب صورًا مشوَّهة. أساءت وسائل الإعلام فهم المشكلة، واتهمت صانعي هابل باستخدام مرآة رخيصة سيئة الجودة. في الواقع، كانت المرآة الآلية الصنع الأكثر دقة في التاريخ، وهي التي صُنِعَت في صورة خاطئة على وجه التحديد؛ لأن عدسة المعايرة وُضعت على نحو غير صحيح في اختبار المختبر. استغرق إصلاح المشكلة ثلاث سنوات وإطلاق مهمة مكوكية عالية الخطورة تتضمن خمسة وثلاثين ساعة من مشي رواد الفضاء مشيات فضائية.[٢٠] وبعد إصلاح مشكلة التلسكوب تمامًا، أصبح قادرًا على التقاط صور شديدة الوضوح لنواة المجرَّة الواقعة على بُعد عشرات الملايين من السنوات الضوئية.[٢١]

لأجل البحث عن الثقوب السوداء في المجرَّات القريبة، تم توجيه التلسكوب بحيث تقع نواة المجرَّة ضمن الفتحة الضيقة لمرسام الطيف. ويمكن استخراج الأطياف في مواقع مختلفة على طول الفتحة الضيقة، بما يتوافق مع مسافات البُعد المختلفة عن مركز المجرَّة. ويشير عرض الخصائص الطيفية إلى متوسط سرعة المادة، حيث يقاس الغاز باستخدام خطوط الانبعاثات إذا كانت المجرَّة حلزونية، وتقاس النجوم باستخدام خطوط الامتصاص إذا كانت المجرَّة إهليلجية.[٢٢] إن الدليل الذي يشير إلى وجود ثقب أسود هو الزيادة الحادة في انتشار الغاز أو سرعات النجوم بالقرب من مركز المجرَّة (شكل ٢٩). ويعد أقرب تركيز كبير للمجرَّات في عنقود العذراء المجرَّي الكائن على بُعد ٦٠ مليون سنة ضوئية. وبالنسبة إلى مجرَّة تقع في عنقود العذراء المجري، يكون الحجم الزاوي لمجال تأثير الجاذبية هو ٠,١٤ ثانية قوسية. وهذا بالكاد ضعف الدقة الزاوية لمرسام الطيف في تلسكوب هابل الفضائي؛ لذا فإن البحث عن الثقوب السوداء عند هذه المسافات يستخدم أقصى إمكانيات تلسكوب الفضاء.

لقد تمخض عن عِقد كامل من هذا العمل البطيء والأصعب نجاحًا؛ حيث رُصد نحو ٢٤ ثقبًا أسود في مجرَّات قريبة.[٢٣] إن جارتنا الأقرب مجرَّة أندروميدا، «إم ٣١» (M31)، تحتوي على ثقب أسود ذي كتلة تبلغ ١٠٠ مليون كتلة شمسية،



شكل ٢٩: تقع المجرَّة «مسييه ٨٤» (M84) في عنقود العذراء المجري، على مسافة ٥٠ مليون سنة ضوئية. تُبين الصورة الموجودة إلى اليسار المنطقة الوسطى للمجرَّة، والتي تعبرها ممرات الغبار. ويوضح المستطيل المكان الذي وُجهت إليه فتحة مرسام الطيف لتلسكوب هابل الفضائي لجمع البيانات الظاهرة على اليمين. ويبين التعرج سرعات الغاز المقاسة على طول فتحة المرسام، مع إشارة الإزاحة الأفقية الأكبر إلى سرعات أكبر. إذا لم يكن في المجرَّة ثقب أسود «مسييه ٨٤»، فلن يحتوي الرسم على سرعات كبيرة للغاية بالقرب من مركز المجرَّة.
«جي. باور، بي جرين/المرصد الوطني لعلم الفلك البصري/ناسا»

ومحاط بمجموعة من نجوم زرقاء شابة. ولا نعرف بعد كيفية تكوينها وقدرتها على البقاء على قيد الحياة في مثل هذه البيئة القاسية،[٢٤] رغم أن هذا قد يكون ظاهرة عامة في المجرَّات الحلزونية. والمصاحب القزم في مجرَّة أندروميدا، «إم ٣٢» (M32)، يمتلك أيضًا ثقبًا أسود، أقل بقليل من كتلة درب التبانة، ويزن ٣,٤ مليون كتلة شمسية داخل منطقة أصغر من سنة ضوئية واحدة.[٢٥] وفي الطرف الآخر من مقياس الحجم يوجد المصدر الراديوي «العذراء أ»، المعروف الآن باسم المجرَّة الإهليلجية العملاقة «مسييه ٨٧» (M87). ويعد الثقب الأسود في مركز «مسييه ٨٧» وحشًا حقيقيًّا، حيث تبلغ كتلته ٦,٤ مليار ضعف كتلة الشمس.[٢٦] وحجم أفق حدثه أكبر من النظام الشمسي! تختلف الثقوب السوداء في الكون المحلي اختلافًا كبيرًا، حيث تتباين كتلها بمعامل يبلغ ٢٠٠٠.

بعد أربعين سنة من كتابته لتلك الورقة البحثية الاستشرافية، وقف ليندن بيل على خشبة المسرح في أوسلو لتلقي جائزة كافلي في أول أعوام منحها. وتشاء الأقدار أن يقف بجانبه مارتن شميدت، مكتشف الكوازارات. لقد كانت رؤية ليندن بيل بشأن الثقوب السوداء مكملًا مثاليًا لمساهمات شميدت: فالظلام يكمن في قلب كل مجرَّة.

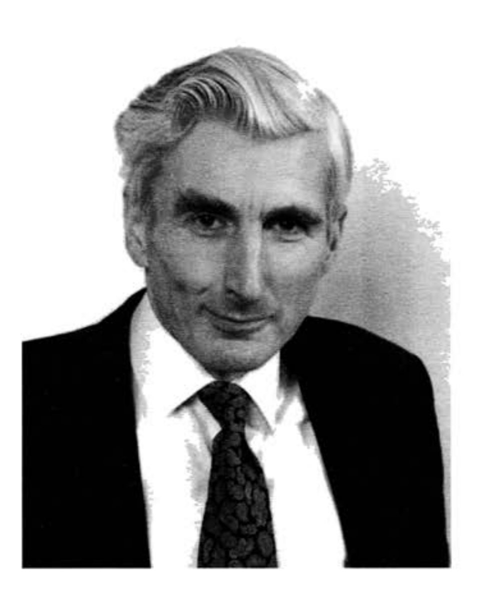
البارون مارتن ريس يروِّض الوحش

استغرق الأمر نحو عقد من الزمان لكي تنتقل الثقوب السوداء من مفهوم نظري مقصور على فئة معينة إلى أن صار في قلب تطور النجوم الضخمة وتفسير النشاط في نُوى المجرَّات. إذا ما كان المرء يريد أن يصير *مُنظِّرًا* فإن جامعة كامبريدج وقتها كانت هي المكان المناسب. فمنها حصل دونالد ليندن بيل على درجة الدكتوراه عام ١٩٦١ وكتب بحثه الأولي عن الكوازارات الميتة عام ١٩٦٩. ومنها حصل ستيفن هوكينج على درجة الدكتوراه في عام ١٩٦٦ وكتب ورقته البحثية عن إشعاع الثقوب السوداء في عام ١٩٧٤. كما حصل مارتن ريس على درجة الدكتوراه بعد عام من حصول هوكينج عليها، وكتب ورقته البحثية الشهيرة حول الثقوب السوداء فائقة الضخامة أيضًا في عام ١٩٧٤.

كان مارتن ريس - والذي لم يكن قد حصل على لقب لورد بعد - هو الذي أنزل الثقوب السوداء الهائلة منزلة محركات الجاذبية، استنادًا لأساس نظري قوي. وبالنسبة إلى أي طالب في علم الكونيات، يعتبر ريس أحد العمالقة؛ فقد حصل على عدد كبير من الجوائز، منها: جائزة تمبلتون، وميدالية ديراك، وجائزة نيوتن، وميدالية بروس، وجائزة ديكارت، ووسام الشمس المشرقة الياباني، ووسام الاستحقاق البريطاني. كما شغل منصب رئيس الجمعية الملكية، ورئيس كلية ترينيتي بكامبريدج، ومدير معهد علم الفلك، وأستاذ بلوميان لعلم الفلك والفلسفة التجريبية في جامعة كامبريدج، والفلكي الملكي في إنجلترا. (ولتواضعه الدائم بشأن واجباته المهنية، وصف ريس التزامات هذا المنصب الأخير بأنها «التزامات بسيطة للغاية لدرجة أن المرء بإمكانه تأديتها بعد وفاته»).

لذلك فعندما التقيته لأول مرة كنت أتوقع أن أرى شخصًا أسطوريًا، فهو من ناحية البنية الجسدية رجل قصير ذو أنف معقوف وعينين رماديتين ثاقبتين. ويتكلم

بهدوء لدرجة أنك تميل للأمام لسماع حديثه. ولصوته إيقاع يضاهي إيقاع شروبشاير، حيث نشأ (شكل ٣٠). أظهر ريس أن تراكم المادة على الثقب الأسود الدوار يمكن أن يؤدي إلى ظهور نفاثتين نسبيتين وانبعاثات غير حرارية عبر الطيف الكهرومغناطيسي، من الموجات الراديوية بطول متر إلى أشعة جاما بطول موجي أصغر من البروتون.[٢٧]

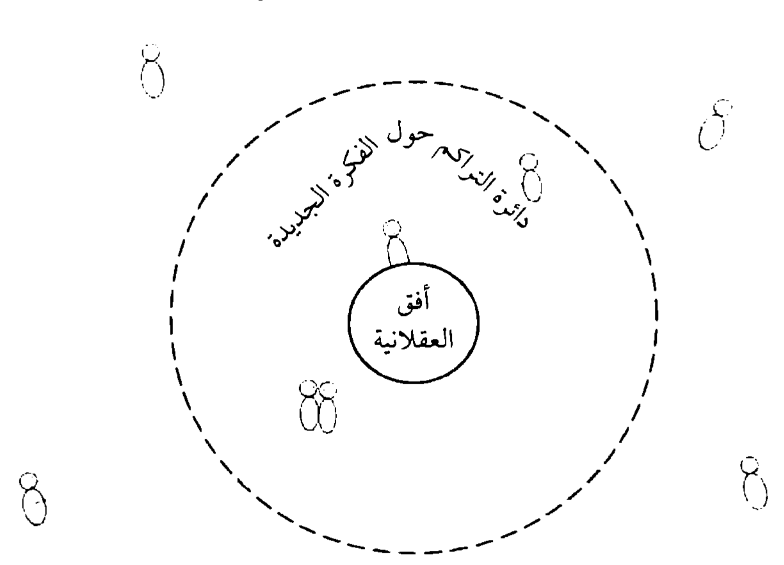


شكل ٣٠: كان مارتن ريس أحد أبرز المنظرين في العالم على مدى أكثر من أربعين عامًا، وكان من أوائل الأشخاص الذين فهموا كيف تعمل الثقوب السوداء كمحركات جاذبية لتوليد كميات هائلة من الطاقة ودفع نفاثات نسبية من البلازما. وريس زميل كلية ترينيتي بجامعة كامبريدج وأستاذ فخري في علم الكونيات والفيزياء الفلكية. كما كان الفلكي الملكي ورئيس الجمعية الملكية للفلك. وفي عام ٢٠٠٥، انضم إلى مجلس اللوردات.

«مارتن ريس/جامعة كامبردج»

تعد المجرَّات النشطة ظاهرة متعددة النطاقات، وهو ما يعني أن فهمها يتطلب مجموعة من الأطوال الموجية وتقنيات القياس. إنها ظاهرة تأسر عقول المُنظِّرين ولكن يصعب رصدها؛ إذ يمكن أن تمتد فصوص انتشار الانبعاث الراديوي لعدة ملايين سنة ضوئية خارج المجرَّة. ويتحكم في تغذية الثقب الأسود المركزي الضخم محتوى البيئة والغازات القريبة في المجرَّة المضيفة. وعلى نطاق عدة مئات من السنين الضوئية، توجد منطقة لتشكيل النجوم النووية وحلقات الغبار. وفي وسط حلقات الغبار، على نطاق يتراوح ما بين أسابيع ضوئية إلى أشهر ضوئية، تُنتج السحب الغازية الكثيفة والسريعة الحركة خطوط انبعاث عريضة. وحتى على مستوى أقرب من ذلك، يضخ القرص المزود الساخن كمية كبيرة من انبعاثات الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية على نطاق يساوي حجم النظام الشمسي. وتتوزع هذه الانبعاثات بسلاسة عبر الطول الموجي كسلسلة متصلة. وأخيرًا، في وسط هذه المستويات المتداخلة التي تشبه دمى ماتريوشكا، يفرض الثقب الأسود فائق الضخامة قبضة جاذبيته على نطاق ذي معامل يُقدَّر بالمليارات.[٢٨]

يعد ريس مسئولًا جزئيًا عن تحول تراكم المادة على الثقب الأسود إلى نموذج تمثيلي لطريقة عمل المجرَّات النشطة، نموذج لا سبيل للتشكيك فيه. ففي مؤتمر عُقد عام ١٩٧٧، سخر عالم الفيزياء الفلكية ريتشارد ماكراي من ميل علماء الفلك (والعلماء في أي مجال) إلى الاستسلام إلى أي فكرة تروج بين العامة. وعرض رسمًا بيانيًا بأشكال كاريكاتورية بسيطة وحدود مرسومة كخطوط متقطعة، يمثل أحدها مجال تأثير الجاذبية، ويمثل الآخر أفق حدث الثقب الأسود (شكل ٣١). دعنا نسمع وصفه للرسوم الكاريكاتورية والنظريات الاجتماعية الكامنة وراءها: «يتضمن هذا الرسم دائرتين. خارج دائرة التراكم، ينشغل علماء الفيزياء الفلكية بأمور أخرى لدرجة تلهيهم عن تلك الفكرة الجديدة. لكن الآخرين داخل هذه الدائرة يبدأون في الاندفاع نحوها بتهور، ولا يتواصل أولئك الأفراد إلا لمامًا بينما يتبعون مسارات سريعة عشوائية، وذلك اعتمادًا على حالتهم الأولية. وخلال اندفاعهم من أجل أن يصبحوا الأوائل، تفوتهم دائمًا النقطة المركزية، وينطلقون بانحراف مفاجئ. ومع وجود عدد كافٍ من علماء



شكل ٣١: نظرة ساخرة لكيفية تفاعل علماء الفيزياء الفلكية مع فكرة جديدة مثل الثقوب السوداء. البعض يطير متخطيًا إياها دون الوقوع في شركها. بينما يصطدم آخرون ويولدون الحرارة ولكن لا يولدون كثيرًا من الضوء، أما معظمهم فيحاصرون داخل نطاق تأثير الفكرة، والبعض منهم ينزلق نحو «أفق العقلانية» حيث يفقدون شكوكهم الصحية.

«ريتشارد ماكراي/جامعة كولورادو»

الفيزياء الفلكية إلى جوار الفكرة، يجب أن يحدث تواصل، ولكنه يحدث عادة في صورة تصادمات عنيفة ... التأثير الدائم الوحيد هو أن بعض الأفراد ربما عبروا أفق العقلانية، والذي جعل الفكرة الجديدة اعتقادًا راسخًا. وهذه الأرواح المسكينة لا تُفلت أبدًا».[٢٩] كان عرض ماكراي ساخرًا، كان ماكراي مقتنعًا بنظرية الثقوب السوداء، لكنه كان يُذكِّر زملاءه بعدم الاستسلام وطرح الشكوك جانبًا.

تذكر أنه بحلول منتصف ثمانينيات القرن العشرين، كانت مجرَّة درب التبانة وحدها هي التي أظهرت أدلة دامغة على وجود ثقب أسود فائق الضخامة. ففي أحد أبحاثه ضمَّن ريس مخططًا بيانيًا يوضح طريقة تسرب الغاز الموجود بين المجرَّات إلى المجرَّات وطريقة إيجاده طريقه ببطء إلى المناطق النووية. ويغذي هذا الغاز والغاز الصادر عن النجوم المتطورة تكوين عنقود نجوم نووية، وهو تجمع كثيف لعدد كبير من النجوم التي تجمعها الجاذبية. ولا يستطيع العنقود النجمي أن يحافظ على نفسه من جاذبية هذه النجوم الكثيرة؛ لذلك ينضغط مكونًا ثقبًا أسود كبيرًا وينمو الثقب الأسود عن طريق التهام الغاز والنجوم. وعلى الرغم من أنه قدمه كمخطط بياني، فإن ريس كانت لديه حجج فيزيائية صحيحة لكل خطوة. لقد دللت هذه النتيجة على أن هذه الثقوب السوداء حتمية على الأرجح، وهذه هي موهبة أفضل العلماء: أخذ حجة معقدة وجعلها تبدو بديهية.

استخدام الكوازارات لسبر أغوار الكون

إننا حتى هذه النقطة وجَّهنا تركيزنا نحو الداخل، محاولين فهم الثقوب السوداء فائقة الضخامة من خلال دراسة الآثار التي تُحدثها على محيطها. ولكن اتضح أنه يمكن استخدام الثقوب السوداء لتشخيص أكثر عناصر الكون إظلامًا، تُستخدم هذه التقنية الكوازارات كمصادر للضوء المكثف والذي يمكن رؤيته على بُعد مسافات شاسعة في الفضاء.

عندما اكتُشفت الكوازارات أشار انزياحها نحو الأحمر إلى أنها كانت على بعد مسافات كبيرة جدًّا. وبعد عامين من اكتشافها، كان رقم القياس للانزياح نحو الأحمر هو $z = 2$، ممَّا يشير إلى أن الضوء كان يسافر لمدة ١٠ مليارات سنة، أو ٧٥٪ من عمر الكون. في الوقت الذي اكتُشفت فيه الكوازارات، كان رقم القياس للانزياح نحو

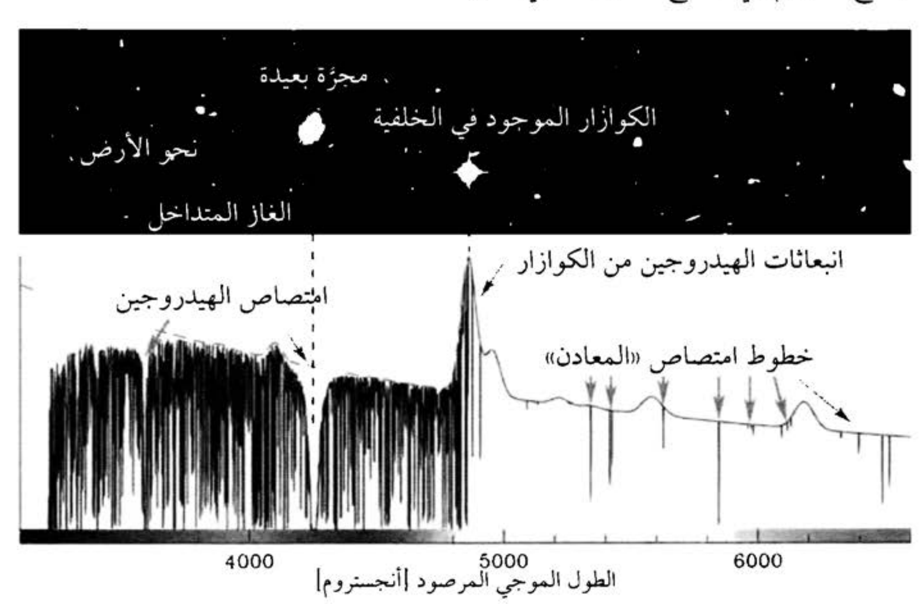
الأحمر للمجرَّة العادية $z = 0.4$، ممَّا يشير إلى ضوء كان يسافر في الفضاء لمدة ٣٣٪ من عمر الكون. لقد فتح استخدام الثقوب السوداء فائقة الضخامة كمنارات ضوئية بعيدة مجالًا جديدًا لعلم الفلك.

تخيَّل صندوقًا أسود طويلًا داخله مظلم ولكن له نهايتين مفتوحتين. إذا ما حدث وتم تسليط شعاع رفيع من الضوء عبر الصندوق ورصده عند الطرف الآخر سيكشف هذا ما إذا كان في الصندوق شيء آخر أم لا. من شأن أي عائق أن يعوق الضوء تمامًا، حتى إن شيئًا ضبابيًّا مثل الغاز سيسبب خفوت الضوء. عندما استخدم علماء الفلك التحليل الطيفي لفصل الأطوال الموجية لضوء الكوازار بدقة، رأوا أن توزيع الضوء السلس كان ممتلئًا بـ «الشقوق» التي فُقد منها الضوء أو تم امتصاصه. أُدركت أهمية هذا الامتصاص لأول مرة قبل ٢٠٠ عام، عندما قام جوزيف فون فراونهوفر برسم خريطة تحتوي على خطوط داكنة وضيقة في طيف الشمس، وأوضح جوستاف كيرشهوف أن الخطوط كانت بسبب وجود عناصر كيميائية في الغلاف الجوي الخارجي البارد للشمس.

لأطياف الكوازار نوعان من خطوط الامتصاص.[٣٠] وخطوط الامتصاص عبارة عن مناطق ضيقة ومظلمة في الطيف، حيث تمتص الأجسام الضوء في الفضاء الذي يحتويها. وتوجد هذه الخطوط بسبب العناصر التي صُنعت في النجوم، مثل النيون والكربون والمغنيسيوم والسليكون. وتوجد أيضًا مجموعة من خطوط امتصاص الهيدروجين ذات الأطوال الموجية القصيرة. وبعد إجراء الكثير من الدراسات، أصبح من الواضح أن النوع الأول من الخطوط ينتج عن غاز مُخصَّب كيميائيًّا في هالات المجرَّات على طول خط البصر بالنسبة إلى الكوازار. وترجع خطوط الهيدروجين إلى الهيدروجين الأصلي الموجود في المساحات الشاسعة بين المجرَّات (شكل ٣٢).[٣١]

والتحليل الطيفي لخط الامتصاص حساس لكميات الغاز الضئيلة، ومن ثَمَّ يمكنه رصد سحب الغاز القاتمة أو المظلمة التي لا تزيد كتلتها عمَّا يتراوح بين ١٠ و١٠٠ ضعف لكتلة الشمس على مسافات تُقدَّر بمليارات السنين الضوئية. يوضح نموذج الكون المتمدد العلاقة بين الانزياح نحو الأحمر والمسافة، وبالتالي يمكن بسهولة تحويل الطيف، وهو خريطة للأطوال الموجية، إلى خريطة للانزياح نحو الأحمر أو المسافة. وبالعودة إلى التشبيه السابق، يعد الصندوق الأسود الطويل مسارًا عبر الكون، وتعد الكوازارات عبارة عن مصابيح توجد في النهاية البعيدة، ويأخذ علماء الفلك أطياف أشعة الضوء هذه لتشخيص المادة المتداخلة. فكِّر في الأمر كعينة أساسية عبر

الكون، ترسم خرائط للمادة عبر الزمن الكوني بدلًا من الزمن الجيولوجي. وبما أنه تم رصد كوازارات ذات انزياح كبير نحو الأحمر يبلغ قدره z = 7، يمكن أن تشمل العينات ٩٥٪ من عمر الكون. واستُخدمت أطياف امتصاص الكوازارات لإظهار أن المادة الموجودة في الفضاء بين المجرَّات أكبر بثمانية أضعاف من المادة الموجودة في جميع النجوم في جميع المجرَّات في الكون.[٣٢]



شكل ٣٢: تبعد عنَّا الكوازارات مسافات كبيرة جدًّا وهي تعمل كمصابيح تلقي الضوء على المواد المتداخلة التي ربما تكون مظلمة ويصعب رصدها. في الجزء العلوي من الشكل: يمر ضوء كوازار عبر مجرَّة كبيرة وهالتها والعديد من السحب الصغيرة المكونة من الهيدروجين والموجودة في الوسط الكائن بين المجرَّات. في الجزء الأسفل من الشكل: طيف الكوازار هو رسم بياني للكثافة مقابل الطول الموجي. ترسم المجرَّة الكبيرة خطوط امتصاص للعناصر الثقيلة في الجزء الأحمر من الطيف، بينما ترسم السحب الهيدروجينية الصغيرة «غابة» من خطوط الامتصاص الضيقة في الجزء الأزرق من الطيف.

«إم مورفي/جامعة سوينبرن»

هناك فرصة ضئيلة لأن يمر ضوء من كوازار بعيد مباشرة عبر مجرَّة أو عنقود مجرِّي. تنصُّ نظرية أينشتاين للنسبية العامة على أن الضوء سوف ينحرف بسبب كتلة الجسم المتداخل. إذا كان مصدر الضوء والجسم المتداخل والراصد كلهم مصطفين بشكل

مثالي حينها تتحول نقطة المصدر - الكوازار - إلى دائرة من الضوء تسمى «حلقة أينشتاين». أما إذا كان اصطفافهم به القليل من الانحراف، تظهر نقطة المصدر كصورة مزدوجة.[٣٣] إن احتمالات حدوث ذلك لا تتجاوز ١٪؛ لذلك لم تُرصد هذه الظاهرة إلا بعد رصد مئات الكوازارات. ولما كان التعديس الثقالي حساسًا للمادة المظلمة وكذلك للمادة المرئية، فقد استُخدم لإظهار أن المادة المظلمة تمثل عنصرًا كلي الوجود في المجرَّات، وتزيد فيها عن المادة العادية بمعامل مقداره ٦.

وقد كان من قبيل المفاجآت السارَّة أن تكون الكوازارات مسبارًا ممتازًا لسبر أغوار الكون. يحتوي الكون على ١٠ آلاف مليار مليار نجم في عدة مئات من مليارات المجرَّات. لكن الكوازارات أنبأتنا بأن هناك كتلة أكبر بكثير في الفراغات بين المجرَّات بل وتوجد كتلة مظلمة أكبر من ذلك ولا يمكن رصدها بأي وسيلة أخرى. كل تلك النجوم وكل تلك المجرَّات ليست سوى ٢٪ من الكون المادي!

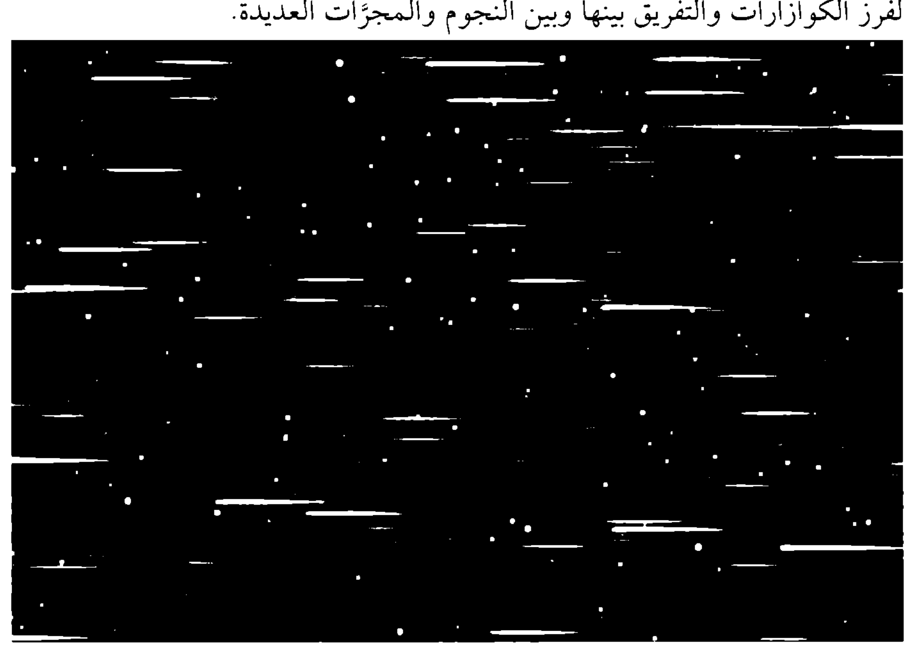
وزن الثقوب السوداء بالآلاف

دعنا نواصل قصة اكتشاف الكوازارات. إن التحليل الطيفي لازم لرصد وفهم الكوازارات؛ حيث يستخدم الطيف البصري لقياس الانزياح نحو الأحمر، والذي يمكن استخدامه لحساب السطوع. ويمكن استخدام طيف عالي الجودة لقياس كتلة الثقب الأسود. ولكن التقدم كان بطيئًا؛ فلا يمكن أن تسجل التلسكوبات الكبيرة إلا طيفًا مرشحًا واحدًا في كل مرة. وخلال ستينيات وسبعينيات القرن العشرين، ارتفع عدد الكوازارات المعروفة من بضع عشرات إلى بضع مئات.

تضمنت أول طفرة في صناعة التلسكوبات تلسكوبات ذات أجهزة بصرية خاصة تصنع صورًا لمساحات كبيرة من السماء. تم الانتهاء من إنشاء تلسكوب شميدت واسع النطاق في مرصد بالومار في عام ١٩٤٨، وخلال خمسينيات القرن العشرين، استُخدم لمسح السماء في المنطقة الشمالية بأكملها بلونين، مع ما يقرب من ألفي لوحة فوتوغرافية، وغطت كل لوحة ٣٦ درجة مربعة، أي بطول يبلغ نحو طول ذراع مفرودة مضمومة قبضتها. وتلقَّى المسح تمويله من الجمعية الجغرافية الوطنية (ناشيونال جيوجرافيك)، باعتباره امتدادًا عامًّا لهدف الجمعية لرسم خرائط العالم. وبُني تلسكوبان توأمان من تلسكوب بالومار-شميدت في أستراليا، ومسحا سماء المنطقة الجنوبية

خلال سبعينيات القرن العشرين. وتضمنت كل صورة مليون مجرَّة وعشرات الآلاف من الكوازارات والمجرَّات النشطة.

يتطلب إيجاد الواحد بالمائة من المجرَّات ذات النشاط النووي معلومات إضافية. طوَّر المصممون البصريون منشورًا كبيرًا يمكن وضعه في المسار البصري لتلسكوب شميدت. رسم المنشور كل مصدر خافت للضوء في طيف صغير على لوحة التصوير الفوتوغرافي. تمتلك الكوازارات خطوط انبعاث قوية وواسعة، وكان من المأمول أن تبرز تلك الخطوط لأن خط الانبعاث سيظهر كنقطة على قمة الخط (شكل ٣٣). كان العثور على الكوازارات بالعين المجردة سابقًا يتطلب خبرة كبيرة، ولكن فيما بعد تم تطوير آلات لمسح ورقمنة اللوحات والبحث عن الكوازارات باستخدام الخوارزميات لفرز الكوازارات والتفريق بينها وبين النجوم والمجرَّات العديدة.



شكل ٣٣: يمكن رسم أطياف متعددة من خلال وضع منشور كبير في المسار البصري للتلسكوب، بحيث تظهر صورة مباشرة لكل جرم (النقاط)، وطيف على يمينه (الخطوط الأفقية). وتعد معظم الأجرام الموجودة في أي مجال رؤية نجومًا أو مجرَّات ذات أطياف سلسة وعديمة الوضوح عند هذه الدقة المنخفضة، لكن الكوازارات النادرة تبرز لأنها تمتلك خطوط انبعاث قوية وعريضة تشبه النقط الموجودة على قمة الخط. يقع الكوازار «٣ سي ٢٧٣» (3C 273) بالقرب من وسط هذه الصورة الفوتوغرافية.

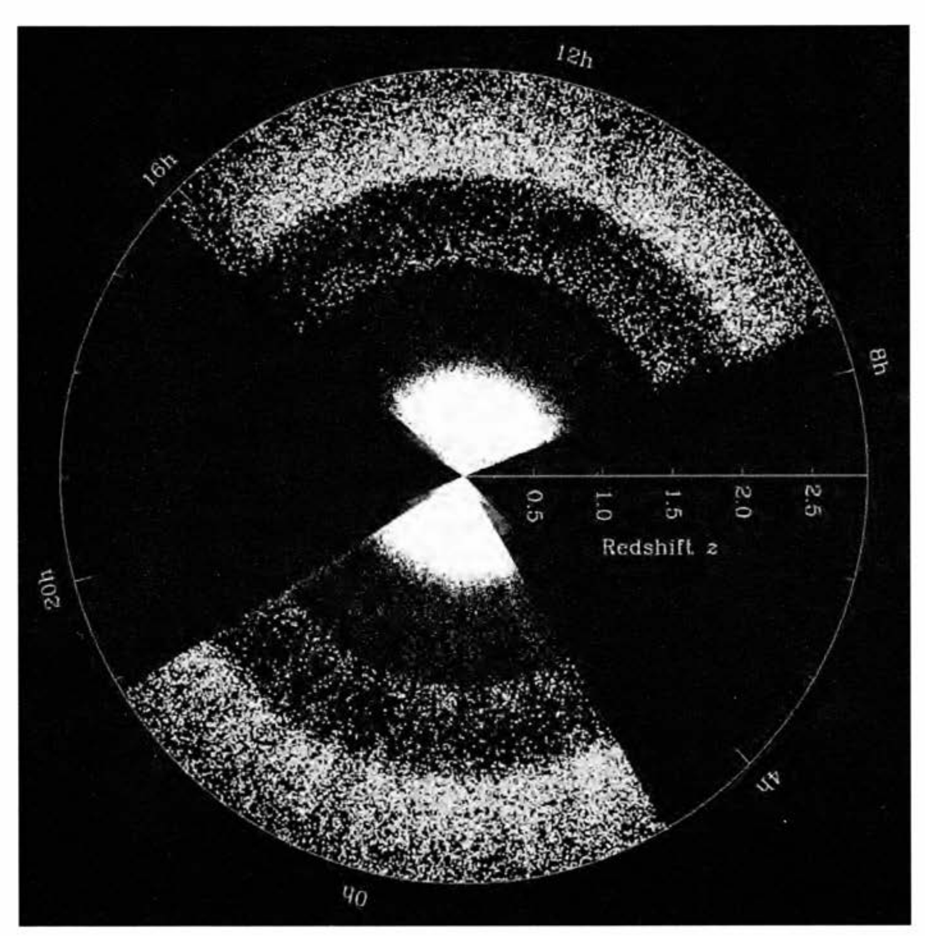
«ديفيد هاوورث»

لقد انغمست بنفسي في عملية صيد الكوازارات باستخدام هذه الطريقة، وكان هذا في كونابارابران في جبال وارومبانجل في نيو ساوث ويلز بأستراليا، تلك البلدة النائمة على حافة المناطق النائية تمثل قاعدة تلسكوب شميدت الإنجليزي، الأخ التوأم لتلسكوب بالومار-شميدت المبني في نصف الكرة الجنوبي.[٣٤] لقد أُرسِلتُ إلى هناك كطالب دراسات عليا في جامعة إدنبرة للمساعدة في عملية مسح باستخدام المنشور الفوتوغرافي. لم يكن هناك أي معاناة في الانتقال من الشتاء الأسكتلندي القاتم إلى الصيف الأسترالي الحار. وفي غضون بضعة أيام من وصولي، تدربت في غرفة مظلمة وكنت أقوم بعمليات الرصد طوال الليل وأحمض اللوحات الفوتوغرافية قبل الذهاب إلى الفراش. كان طول اللوحة ١٤ بوصة، وسمكها ملليمتر واحدًا، وكان التعامل معها في الظلام صعبًا للغاية. ورغم مرور كل هذه الفترة الزمنية، فلا يزال يزعجني أن أعترف أنني كسرت بعضًا منها، ممَّا أهدر ساعات من العمل على التلسكوب. وفي بعض الأحيان، كنت أعاني الألم فعليًّا جرَّاء جرح يدي بسبب الحواف الحادة، ما كان يضيف قطرات من دمي إلى مظهر الأفلام أو المحلول المثبت للصور.

لكن عندما تصفو السماء وتتعرض اللوحات للضوء على نحو جيد، كان الأمر يستحق كل هذا الجهد. كانت كل لوحة عبارة عن صورة سلبية مع خلفية رمادية شاحبة وآلاف من الخطوط الداكنة الصغيرة التي تمثل الأطياف، كنت أنام حتى الغداء وفي فترة ما بعد الظهر أركِّبُ اللوحات في صندوق ضوئي وأمسحها ضوئيًّا باستخدام المجهر. كانت طريدتي المراوغة عبارة عن خط يتضمن نقطة عند الطرف الأزرق، والتي تشبه الشرغوف (فرخ الضفدع) نوعًا ما. كانت هذه النقطة هي خط انبعاث الهيدروجين الذي يميز الكوازار عن النجم الساخن. أتذكر دفقة الإثارة التي شعرت بها عندما اكتشفت أول كوازار لي، ولم تتلاشَ هذه الإثارة بعد العثور على العشرات، رغم أن قوة رؤيتي بدأت تضعف بعد ساعات من التحديق في المجهر. كان كل شرغوف من هذه الشراغيف الصغيرة عبارة عن ثقب أسود ضخم يبعد عنَّا مليارات من السنوات الضوئية، ويبعث سيلًا من الإشعاع في الكون. وبعد أن رصدت الكوازار رقم مائة، ذهبت إلى رحلة احتفالية مشيًا على الأقدام في الجبال المحلية، متجولًا في الأدغال البرية. وفي وقت العشاء، أعطاني علماء الفلك المحليون نصيحتهم، إذ ذكَّروني أن أستراليا بها ثلاثة من أكثر العناكب السامة في العالم، وأربعة من أشد خمسة ثعابين سُمًّا في العالم.

حدثت الطفرة الثانية في تسعينيات القرن العشرين، عندما تم استبدال الكاشفات الإلكترونية ذات الأبعاد الكبيرة أو الأداة ذات الشحنة المزدوجة (CCD) باللوحات الفوتوغرافية. وباستخدام الألياف أو الفتحات، يتم جمع الضوء من مئات الأهداف وعرضه على الأداة ذات الشحنة المزدوجة. تحتوي التلسكوبات الكبيرة الآن على مرسام طيف يمكن أن يغطي درجة مربعة أو أكثر، أو ما يساوي أضعاف مساحة البدر. وتتمثل أداة صيد الكوازارات البارزة في التلسكوب الذي يبلغ قطره ٢,٥ مترًا ويقوم بعمل «مسح سلون الرقمي للسماء». لن يدخل هذا التلسكوب قائمة أكبر خمسين تلسكوبًا في العالم (وبالطبع لن يدخلها تلسكوب هابل الفضائي كذلك)، لكن مطيافه ومجس سي سي دي هما اللذان يوفران له اصطياد غير عادي للضوء؛ فقد قام بقياس الانزياح نحو الأحمر في ٢ مليون مجرَّة و٥٠٠ ألف كوازار (شكل ٣٤). وبالتأكيد فإن هذه الأطياف الرقمية أفضل بكثير من الخطوط الصغيرة التي استخدمتها في سبعينيات القرن العشرين لاكتشاف الكوازارات، وتعد الأطياف الناتجة عن مسح سلون ذات جودة عالية بدرجة تكفي لقياس كتلة الثقب الأسود.

رأينا مدى صعوبة «وزن» الثقب الأسود فائق الضخامة. وقد وُزن الثقب الأسود فائق الضخامة الأقرب لنا، في مركز مجرَّتنا، بدقة باستخدام النجوم الفردية التي تدور حوله في مدارات بيضاوية. وأُجري ثاني أدق قياس لكتلة ثقب أسود عام ١٩٩٥، عندما اكتشف علماء الفلك الراديوي «الميزر المائي» - وهو نسخة من أشعة الليزر لها طول موجي أكبر، تنتج عندما تتهيأ الظروف طبيعيًّا للغاز (في هذه الحالة، جزيئات الماء) لتُصدر إشعاعات مكثفة ونقية - تدور في قرص رفيع في وسط المجرَّة النشطة القريبة «إن جي سي ٤٢٥٨» (NGC 4258). وتُظهر المجرَّات الأخرى أيضًا انبعاثات ميزر من جزيئات الماء في مناطقها النووية الكثيفة، وتسمح الخطوط الطيفية الناتجة بقياس سرعات الميزر بدقة بالغة بواسطة الأساليب الراديوية.[٣٥] وفي مجرَّة «إن جي سي ٤٢٥٨»، تتوافق مواقع وسرعات الميزر مع قوانين كبلر للحركة، ممَّا يعني وجود كتلة مركزية تبلغ ٣,٨٢ مليون ضعف لكتلة الشمس مع نسبة خطأ قدرها ٠,٣٪ فقط. يمتد انبعاث الميزر إلى أقل من سنة ضوئية من مركز المجرَّة، أو أصغر بمقدار ١٠٠٠ مرة من مجال تأثير الجاذبية؛ لذلك تتركز الكتلة الكبيرة في منطقة لا تحتوي عادة سوى بضع مئات من النجوم. ويعد الثقب الأسود هو التفسير الوحيد القابل للتطبيق. كما أن انبعاث الميزر أمر نادر؛ لذا فقد ثبت صعوبة تكرار عملية



شكل ٣٤: استخدم «مسح سلون الرقمي للسماء» تلسكوبًا بقطر ٢,٥ مترًا في نيو مكسيكو ومرسام طيف كفء قادر على رصد أجسام متعددة لقياس الانزياح نحو الأحمر لعدد غير مسبوق من المجرَّات والكوازارات. رصد مشروع «المسح الطيفي للتذبذب الباريوني» (BOSS) ٥٠٠ ألف مجرَّة و١٠٠ ألف كوازار، ويظهر جزء صغير منها في هذا «المخطط الدائري» للسماء، ويزيد الانزياح نحو الأحمر أو المسافة شعاعيًا، وتظهر المجرَّات كنقاط عند انزياح نحو الأحمر بمقياس أقل من ١، وتظهر الكوازارات كنقاط عند الانزياح نحو الأحمر بمقياس يتراوح بين ١,٥ و٣.

«إم بلانتون/مسح سلووان الرقمي للسماء»

الرصد هذه، ولكن ربما يصبح من الممكن قريبًا استخدام قياس التداخل عند أطوال موجية ملليمترية.[٣٦]

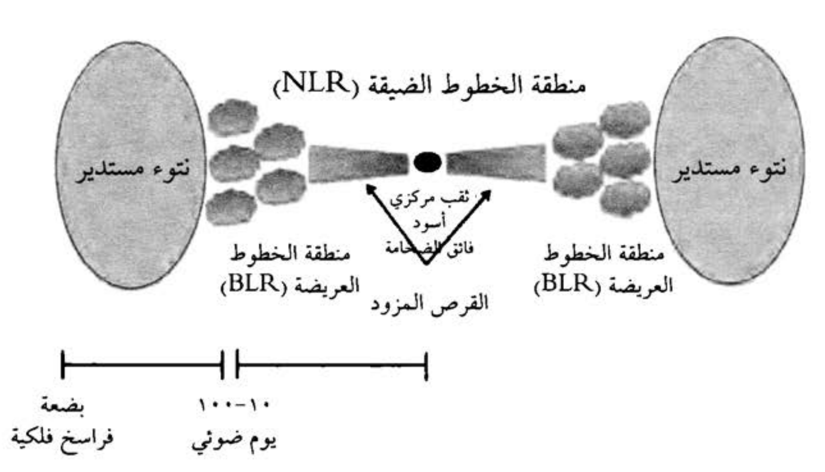
يمكن وزن الثقوب السوداء الهادئة في المجرَّات الموجودة ضمن منطقتنا الكونية باستخدام حركة الغاز أو النجوم القريبة من النواة، لكن الجهود التي استمرت لعدة عقود أسفرت عن حساب كتلة سبعين ثقبًا أسود وحسب. وتوسيع هذه القياسات إلى ما وراء عنقود العذراء المجرِّي، الذي يبعد نحو ٦٠ مليون سنة ضوئية، هو أمر مستحيل باستخدام التقنيات الحالية.

كما رأينا تمتلك الكوازارات ثقوبًا سوداء فائقة الضخامة تعمل كمحركات للجاذبية عن طريق تحويل الكتلة التي تسقط إلى إشعاع شديد. لماذا لا نستخدم السطوع لاستنتاج كتلة الثقب الأسود؟ إنها فكرة جيدة، لكنها لا تنجح عمليًّا؛ فبعيدًا عن كونها مصابيحَ ذات سطوع قياسي، فإن سطوع الكوازارات يتباين من كوازار إلى آخر بمعامل يُقدَّر بالآلاف. وبالنسبة لكتلة الثقب الأسود، يعتمد السطوع على كفاءة تراكم المادة ومعدل دوران الثقب الأسود وكمية الغاز والغبار في المناطق المركزية. لكن المؤسف أن طاقة الكوازار دليل ضعيف على كتلة الثقب الأسود.

وعندما بدا الأمر كما لو أن علماء الفلك وصلوا إلى نهاية الطريق، توصلوا إلى طريقة ذكية لاستنتاج كتلة الثقب الأسود في المجرَّات النشطة القريبة؛ وهي طريقة تستخدم إحدى ميزات آثار الكوازارات، ألا وهي خطوط الانبعاثات العريضة. يقع الغاز الساخن الذي يُنتج خطوط الانبعاث هذه على مسافة سنة ضوئية من الجرم المركزي؛ لذلك فإن الثقب الأسود يسيطر على حركته. يجب أن يتبع الغاز في هذه المنطقة معادلة بسيطة، وهي: $M_{BH} \approx RV^2/G$، حيث G هي ثابت الجاذبية، وV هي سرعة الغاز. ويمكن أن تعطينا المعادلة نفسها كتلة الشمس إذا عرفنا سرعة وبُعد أي كوكب يدور حولها. وفي حالة الثقب الأسود، يتم اشتقاق سرعة دوران الغاز بسهولة من عرض خطوط الانبعاثات. يتبقى لنا فقط R - التي تساوي حجم المنطقة المُنتجة لخطوط الانبعاثات العريضة - ككمية مجهولة. وتشير عدة مناقشات فيزيائية إلى أن قطر المنطقة يبلغ حوالي ٠,٠١ فرسخًا فلكيًّا، أو ١٠ أيام ضوئية، أي أكبر بعشر مرات من النظام الشمسي (شكل ٣٥).[٣٧] وهذا أصغر بكثير من أن يقيسه أي تلسكوب، بالنسبة لمعظم المجرَّات. فكيف يمكن قياسه إذن؟ تستخدم الطريقة الذكية حقيقة أن شدة ضوء الكوازارات والمجرَّات النشطة تختلف مع الوقت.

دعونا نتخيَّل الوضع. إن القرص المزود الذي يولد السطوع الهائل للكوازار صغير للغاية بحيث يمكننا اعتباره نقطة مصدر للضوء. ويتفاوت السطوع على النطاقات

الزمنية للأيام، وهو ما كان إحدى الحُجج الأصلية للدلالة على وجود الثقوب السوداء فائقة الضخامة، حيث لا يمكن أن يكون المصدر أكبر من وقت تحرك الضوء عبره. كان منطق هذه الحُجة هو أنه إذا حدثت تباينات في الضوء الصادر من جرم مفرد، فإن التباينات الأكثر سرعة تشير إلى جرم أصغر. ينتقل الضوء من نقطة المصدر المركزية ويصطدم بالغاز سريع الحركة الذي يسبب خطوط الانبعاثات. يستجيب هذا الغاز أو «يصدر صدى» بالنسبة إلى نقطة المصدر المتغيرة بتأخير t، يمكن حسابه عن طريق وقت تحرك الضوء عبر الغاز، $t = R/c$، حيث c هي سرعة الضوء. يطلق على ذلك اسم «تعيين تردد الصدى»؛ لأننا نرسم خريطة للطريقة التي يُنتج من خلالها ضوء نقطة المصدر «أصداء» للغاز، والوقت الذي تستغرقه الأصداء في الوصول يُعلِمنا بحجم منطقة الغاز الساخن.



شكل ٣٥: مقطع عرضي تخطيطي للمنطقة الداخلية لمجرَّة نشطة أو كوازار يوضح المكونات التي يمكن استخدامها لقياس كتلة الثقب المركزي الأسود فائق الضخامة (SMBH). عندما يتغير الضوء من «المحرك» المركزي، تستجيب سحب الغاز في منطقة الخطوط العريضة بتأخير زمني يتراوح ما بين ١٠ و١٠٠ يوم ضوئي، وتقاس سرعة تلك السحب من خلال عرض خطوط طيفها. ونتيجة لذلك، يمكن تقدير كتلة الثقب الأسود الذي يسبب هذه الحركة، وتسمى هذه التقنية «تعيين تردد الصدى».

«سي ريتشي/الجامعة الكاثوليكية في تشيلي»

إن عمليات الرصد اللازمة بسيطة ولكنها مملة. تم إعداد «حملة» رصد باستخدام تلسكوبات موزعة في أنحاء العالم، تقيس أطياف عينة من الكوازارات أو المجرَّات النشطة. إن مشاركة مجموعة من التلسكوبات في أنحاء العالم توفر تغطية على مدار الساعة للتباين وتضمن وجود البيانات حتى لو حُجِبَ موقع أو موقعين. وتُجمع الأطياف من خلال عمليات رصد تجري لمدة أسابيع منفصلة تتوزع على مدى العام، ومن ثمَّ تؤخذ عينات من جميع النطاقات الزمنية من الأيام إلى الشهور. «يستجيب» غاز خط الانبعاث للإشعاع الصادر عن الثقب الأسود مع تأخير زمني بسبب وقت انتقال الضوء. ويُظهِر التأخير الزمني حجم منطقة الخط العريض، والتي بدورها تُظهِر كتلة الثقب الأسود.[٣٨]

إذن، يعتمد تعيين تردد الصدى على دقة الوقت وليس الدقة المكانية. طُبِّقَت هذه الطريقة لأول مرة على «إن جي سي ٥٥٤٨» (NGC 5548)، وهي إحدى مجرَّات سيفرت النشطة الأصلية. ويبلغ حجم ثقبها الأسود المركزي ٦٥ مليون ضعف لكتلة الشمس، مع نسبة شك تبلغ ٤٪.[٣٩] وقد أسفرت حملات الرصد المكثفة باستخدام التلسكوبات الصغيرة عن حساب كتلة ستين ثقبًا أسود في المجرَّات النشطة القريبة.[٤٠] ويبين البحث أن المجرَّات النشطة الأكثر قوة تحتوي مناطق أكبر ذات غاز سريع الحركة.

هنا تبدأ المتعة، يُظهِر عمل تعيين تردد الصدى المضني مدى ارتباط حجم منطقة الانبعاث بسطوع المجرَّة النشطة. فالآن، بدلًا من القيام بحملة رصد طويلة المدى تتضمن مئات أو آلاف القياسات للمجرَّة النشطة المعنية، يمكن استخدام طيف واحد فقط لتقدير كتلة الثقب الأسود. يعطي عرض خط الانبعاث قيمة V ويعطي اللمعان قيمة R، وهو كل ما نحتاجه في المعادلة $M_{BH} \approx RV^2/G$. وتعتبر كتلة الثقب الأسود الناتجة عن طيف منفرد غير مؤكدة بمعامل ٣، أو ٣٠٠٪، ليس هذا بالأمر الرائع، لكنه مناسب للعمل الإحصائي. فبدلًا من قضاء أشهر في عمليات الرصد لحساب كتلة ثقب أسود واحد، يمكنك حساب كتلة ١٠٠ ثقب أسود في ليلة واحدة، وقد نُشرت عشرات الآلاف من قيم الكتل.[٤١] والآن صار علماء الفلك يجمعون الثقوب السوداء الضخمة بأعداد هائلة.

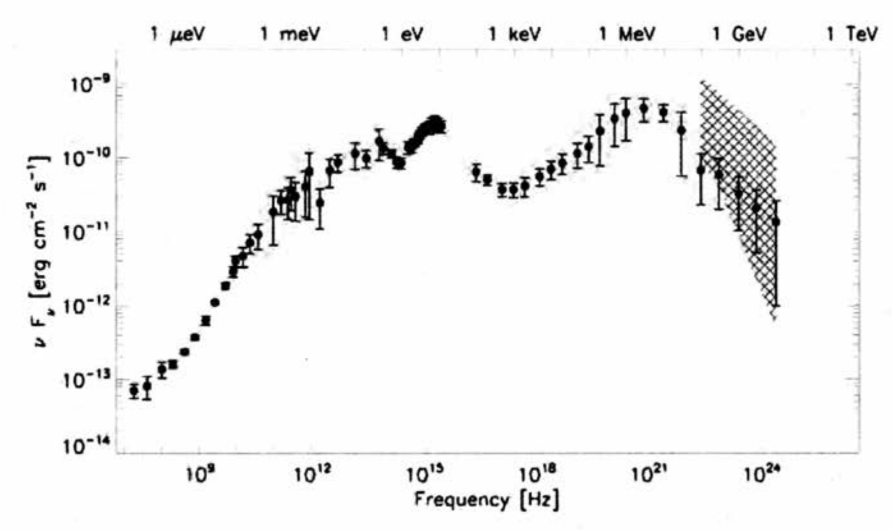
قوة تراكم المادة في الكون

تسقط المادة على الثقب الأسود وترتفع درجة حرارتها، وكذلك تسبب طاقة

دوران الثقب الأسود الدوار تسارع الجزيئات التي ينبعث منها بعد ذلك الإشعاع، وتحدث هذه العملية بكفاءة عالية. وإذا حددنا الكفاءة على أنها ناتج الطاقة مقسومًا على الكتلة-الطاقة لجميع المدخلات، فإن كفاءة تراكم المادة على الثقب الأسود تبلغ نسبتها ١٠٪ تقريبًا، مقارنة بنسبة ١٪ للانشطار النووي أو الاندماج النووي، و١٠^-٧^٪ للطاقة الكيميائية. يمكن أن تحرر المادة ١٠٪ من كتلتها-طاقتها في صورة فوتونات من خلال السقوط وحسب!

ما مقدار الكتلة اللازمة لتحويل الثقب الأسود فائق الضخامة إلى كوازار؟ ليس مقدارًا كبيرًا؛ فلكي يتسنى لثقب أسود ذي كتلة تساوي ١٠٠ مليون كتلة شمسية توليد طاقة شبيهة بالكوازار تبلغ ١٠^٣٩^ واط بكفاءة ١٠٪، لا بد من تراكم كتلة شمسية واحدة كل عام.[٤٢] تأمل هذا الأمر من خلال المثال التالي: إن الثقب الأسود إذا ما التهم نجمًا واحدًا فقط كل عام كوجبة خفيفة فإن هذا سيبقيه ساطعًا أكثر من مجرَّة نجوم بأكملها. فكما قال جون أبدايك: «لا تزال هناك طاقة كافية في نجم واحد مهمَل تكفي لإنارة جميع السماوات التي يتخيلها كل المجانين».[٤٣] لكن تغذية الثقب الأسود تمثل تحديًا؛ لأن الإشعاع الناتج عن الكوازار يمارس ضغطًا يُبعد المادة عن المصدر المركزي. وهذا مماثل لظاهرة ضغط الإشعاع الذي يجعل ذيل المذنب يتجه بعيدًا عن الشمس. فلكي تتراكم المادة، يجب أن تتجاوز قوة جاذبية الثقب الأسود فائق الضخامة نحو الداخل ضغط الإشعاع الذي يتجه نحو الخارج.

لقد استغرق الوصول إلى صورة كاملة عن قوة تراكم المادة في المجرَّات النشطة وقتًا طويلًا من علماء الفلك؛ ذلك لأن العمليات الفيزيائية القريبة من الثقوب السوداء تنشر الطاقة عبر نطاق هائل من الأطوال الموجية.[٤٤] على سبيل المثال، رُصد الكوازار «٣ سي ٢٧٣» (3C 273) النموذجي عند ترددات تتراوح بين ١٠^٨^ هرتز و١٠^٢٤^ هرتز، تتباين الأطوال الموجية بمعامل ١٠ آلاف تريليون من الموجات الراديوية بطول ثلاثة أمتار إلى أشعة جاما بطول ثلث حجم البروتون (شكل ٣٦). ومع ذلك، فإن الأطوال الموجية الوحيدة من هذا النطاق الواسع التي يمكن رصدها في المراصد الأرضية تمثل مجموعة واسعة من الموجات الراديوية وشريحة ضيقة من الأشعة تحت الحمراء القريبة عبر الأطوال الموجية البصرية. أما البقية فتتطلب أقمارًا صناعية متخصصة تدور في مدار الأرض.



شكل ٣٦: توزيع الطاقة من الكوازار الساطع «٣ سي ٢٧٣» (3C 273) عبر الطيف الكهرومغناطيسي بأكمله، من الموجات الراديوية الطويلة (١٠^٨ هرتز) إلى أشعة جاما عالية الطاقة (١٠^٢٤ هرتز). يمثل المحور العمودي الطاقة، ويمثل المحور الأفقي التردد (في الأسفل) أو الطاقة (في الأعلى). تبعث النجوم والمجرَّات العادية نطاقًا ضيقًا من الأطوال الموجية البصرية والأشعة تحت الحمراء فقط؛ لذلك يشير هذا النطاق الواسع من الطاقة إلى طاقة الجاذبية وتسارع الجسيمات بالقرب من الثقب الأسود فائق الضخامة.
«إس سولدي/جامعة باريس/ المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي»

إن مشاهدة الكون باستخدام جزء واحد فقط من الطيف الكهرومغناطيسي تؤدي إلى معلومات غير كاملة: مشكلة الفيل. ويعني وضع قوة تراكم المادة بالكامل في الاعتبار أننا يجب أن نفكر في الفيل بأكمله. لقد تبين أن الانبعاثات الراديوية التي لفتت الانتباه أولًا إلى المجرَّات النشطة في خمسينيات القرن العشرين كانت جزءًا صغيرًا جدًّا من إجمالي طاقة الكوازار؛ فهذه الانبعاثات صادرة عن الإلكترونات النسبية بالقرب من الثقب الأسود وفي النفاثتين. دعنا نُسمِّها ذيل الفيل. أما المساهمة الأكثر أهمية التي تلي ذلك فهي انبعاث الأشعة السينية عالية الطاقة، والتي تأتي أيضًا من الإلكترونات النسبية. دعنا نسمِّها خرطوم الفيل. والأهم من ذلك هو الأشعة تحت الحمراء التي تأتي من الغبار البارد بعيدًا عن الثقب الأسود، بدرجات حرارة تتراوح بين ١٠ و١٠٠ كلفن. الغبار هو ساق الفيل. أما المساهم الأكبر في قوة الكوازار هو القرص

المزود، وهو قريب جدًّا من الثقب الأسود، وتبلغ درجة حرارته حوالي ١٠٠ ألف كلفن ويُصدِر معظم طاقته في صورة موجات أشعة فوق بنفسجية وأشعة سينية.[٤٥] هذا هو الجزء الأكبر من الفيل؛ جسمه.

كانت بداية اكتشاف المجرَّات النشطة من خلال انبعاثاتها الراديوية؛ لأنها تبرز في السماء الهادئة راديويًّا بوجه عام، لكن في غضون بضع سنوات، أدرك علماء الفلك أن معظم المجرَّات النشطة لها انبعاثات راديوية ضعيفة للغاية، لدرجة تجعلها غير مرئية خلال عمليات البحث عن الموجات الراديوية. وقد عُثر خلال عمليات المسح البصرية على عشرة أضعاف ما عُثر عليه في عمليات المسح الراديوية. ثم في ثمانينيات القرن العشرين، احتار علماء فلك الأشعة السينية بشأن إشارة الأشعة السينية الضعيفة التي يمكن رؤيتها في جميع أنحاء السماء.[٤٦] فافترضوا أنها مجموع العديد من المصادر البعيدة التي كانت أضعف من أن يتم رصدها على نحو فردي. ولكن عندما أضافوا إشعاع الأشعة السينية المتوقع من العينات البصرية الموجودة للمجرَّات النشطة، كانت أقل من الأشعة السينية الخلفية بمعامل ١٠. لم يُحلُّ اللغز تمامًا، لكن من الواضح الآن أن الأشعة السينية الخلفية ترجع إلى المجرَّات النشطة التي أغفلتها عمليات المسح البصرية.[٤٧] فقد أصبحت غير مرئية بسبب الغبار، إذ يمكن أن يؤدي وجود الغبار إلى تغيير توزيع الطاقة في المجرَّة النشطة على نحو جذري عن طريق إعادة معالجة الانبعاثات البصرية وتحويلها إلى انبعاثات أشعة تحت الحمراء. ولا يؤثر الغبار على فوتونات الأشعة السينية؛ لذلك فإن الرؤية الأكثر وضوحًا والأكثر اكتمالًا لمجموعة المجرَّات النشطة تأتي من عمليات المسح بحثًا عن الأشعة السينية.

الثقوب السوداء الضخمة ليست مخيفة

دعنا نخفف من عامل الخوف المرتبط بالثقوب السوداء، فالثقوب السوداء ليست مثل مكانس كهربائية كونية تمتص كل شيء حولها. تمتلك الثقوب السوداء بالفعل مجال تأثير جاذبية، مثل أي جسم آخر ذي كتلة، لكن لو أن الشمس انكمشت فجأة وتحولت إلى ثقب أسود، فإن الجاذبية التي توجد الأرض في نطاقها ستبقى دون تغيير وستستمر الأرض في الدوران بلا اضطراب في مدارها (رغم أن البشر سينزعجون «بشدة» من فقدان ضوء الشمس والطاقة بعد ثماني دقائق فقط). ثانيًا، لسنا أمام خطر

وشيك بمقابلة ثقب أسود؛ فجزء صغير وحسب من النجوم هو فقط الذي يموت في شكل ثقوب سوداء، ولا توجد ثقوب سوداء في ضاحية الشمس.[٤٨]

أقرب ثقب أسود نجمي إلينا هو «في ٦١٦ مون» (V616 Mon)، وتقترب كتلته من ١٠ أضعاف كتلة الشمس ويبعد عنَّا مسافة ٣٠٠٠ سنة ضوئية. والثقب الأسود الأقرب التالي له هو الثقب الأسود النمطي «الدجاجة إكس-١»، والذي تبلغ كتلته ١٥ ضعفًا لكتلة الشمس ويقع على مسافة ٦١٠٠ سنة ضوئية. ومع ذلك، لن يكون لدينا التكنولوجيا اللازمة لزيارة الثقب الأسود لعقود عديدة، حتى باستخدام مجسَّات الفضاء المصغرة؛ لذا فإن أي نقاش حول سقوط البشر في ثقب أسود هو نقاش افتراضي. أما أقرب ثقب أسود ضخم فتبلغ كتلته أربعة ملايين كتلة شمسية ويقع في مركز مجرَّة درب التبانة، على بُعد ٢٧٠٠٠ سنة ضوئية. ويوجد أقرب ثقب أسود فائق الضخامة في مركز المجرَّة الإهليلجية العملاقة «ميسييه ٨٧» (M87)، على بُعد ٦٠ مليون سنة ضوئية في عنقود العذراء المجرِّي. وتعد كتلة هذا الوحش كتلة هائلة، إذ تبلغ ٥ مليارات ضعف لكتلة الشمس.

لكن رغم كل ما سبق، ليست الثقوب السوداء الهائلة بالضخامة التي تتخيلها. إن صيغة نصف قطر شفارتسشيلد التي تحسب مساحة أفق الحدث بأنها $R_S = GM/C^2$، وبالتالي فإن مساحة أفق الحدث تتناسب مع الكتلة. وتُقدَّر مساحة أفق الحدث بـ ٣٠٠ مليون كيلومتر، أو ضعف المسافة بين الأرض والشمس، بالنسبة للثقب الأسود لكوازار أكبر من الشمس بـ ١٠٠ مليون ضعف. إن زيادة الحجم خطيًّا مع الكتلة تعني أن الكثافة داخل أفق الحدث تقل وفقًا لمربع الكتلة. تبلغ كثافة الثقب الأسود النجمي الذي تبلغ كتلته ٣ أضعاف كتلة الشمس عشرة آلاف تريليون ضعفًا لكثافة المياه، في حين أن كثافة الثقب الأسود في مركز المجرَّة تزيد على كثافة الماء بألف ضعف فقط. ولثقب أسود لكوازار تبلغ كتلته ١٠٠ مليون ضعف كتلة الشمس كثافة تساوي ١٠٪ فقط من كثافة الماء، وأكبر الثقوب السوداء لها كثافة أقل بمقدار ١٠ آلاف ضعف. كم هو من المخيف أن نجد ثقبًا أسود أقل كثافة من الهواء الذي نتنفسه!

دعنا نفكر في ذلك لمدة دقيقة، إذا أخذت مساحة تساوي مساحة النظام الشمسي وملأتها بالهواء، ستصير ثقبًا أسود. فإذا تمكنت من صنع محيط كبير بدرجة كافية، فسيطفو هذا الثقب الأسود فوق سطح المياه كالفقاعة.

من المحتمل أن يكون عبور أفق حدث ثقب أسود ضخم أقل خطورة من الدخول إلى ثقب أسود نجمي. أحد أسباب ذلك هو أن التأثيرات المعكرونية ستكون أقل احتمالًا؛ إذ ينخفض التسارع الناتج عن قوة التمدد بسرعة مع زيادة كتلة الجرم المدمج، وفي أفق الحدث لثقب أسود كتلته تساوي ١٠٠ مليون كتلة شمسية، فإن هذا التسارع سيكون أقل من تسارع الجاذبية الأرض بقيمة ضخمة، وسوف يعبر المسافر المقدام أفق الحدث دون الشعور بأي شيء.

يوحي هذا بأنها المغامرة الأخيرة للمسافر في الفضاء في المستقبل البعيد. ابحث لنفسك عن ثقب أسود، وأي شيء أكبر من ١٠٠٠ ضعف كتلة الشمس سيفي بالغرض. واجمع أصدقاءك وعائلتك وضعهم في سفينة فضاء على مسافة آمنة، سيعتقدون أن هذا وداع أخير؛ لأنه لا أحد يستطيع الهروب من ثقب أسود. ثم ضع سفينتك الفضائية على مسار سقوط حر نحو أفق الحدث، وكلما اقتربت من أفق الحدث، أشِر لهم بيدك إشارة عارضة، سيرى أصدقاؤك صورتك ممددة ومشوَّهة. كما ستتحول أيضًا إلى اللون الأحمر؛ لأن الفوتونات تكافح للهروب من الجاذبية الشديدة للثقب الأسود. ولن ترى أو تشعر بأي شيء غير عادي بينما تمر عبر أفق الحدث إلى مصير مثير للاهتمام ولكنه غير معروف، وستكون آخر صورة لك يراها أصدقاؤك وعائلتك هي صورة لك تُلوِّح بيدك، ثم تتلاشى الصورة وتتحول إلى اللون الأحمر وتتجمد إلى الأبد.

دعنا نراجع ما وصلنا إليه حتى الآن.

رغم أن بعض العلماء الأوائل كانوا يحلمون بالثقوب السوداء، فقد تطلب الأمر نظرية جريئة جديدة للتنبؤ بها. وكانت خصائصها غريبة للغاية لدرجة أن صاحب النظرية - ألبرت أينشتاين - لم يعتقد بوجود مثل هذه الوحوش، ثم حفزت فكرة الثقوب السوداء علماء الفيزياء فضاعفوا جهودهم للتوفيق بين نظريات الجاذبية والعالم الكمومي.

في تلك المرحلة كان الأمر متروكًا للراصدين؛ فليس كل ما يمكن أن نحلم به ونخطط له ونحسبه حقيقيًا، تتشكل الثقوب السوداء كلما مات نجم ضخم، ولكنها تكون غير مرئية للعين؛ لذلك لا يمكن رؤيتها إلا عندما تدور حول نجم مرئي. وبعد عدة عقود من العمل المضني، اكتُشفت عشرات الثنائيات، حيث كان العضو المظلم في كل نظام منها ضخمًا لدرجة أنه ينبغي أن يكون ثقبًا أسود، كانت البيانات الرصدية مقنعة، ودفع المُنظِّرون الذين راهنوا ضد وجود الثقوب السوداء رهاناتهم.

وفي الوقت نفسه كان الفلكيون يجمعون الأدلة على أن المجرَّات أكثر من مجرد مجموعات كبيرة من النجوم؛ إذ تحتوي مراكز بعض المجرَّات على غاز ساخن دوار ومصادر انبعاثات أشعة سينية وراديوية يمكن لسطوعها أن يفوق سطوع المجرَّة بأكملها ويمكن رؤيتها من معظم أنحاء الكون. ويتسبب في هذا الإشعاع جاذبية الثقوب السوداء التي تبلغ كتلتها ملايين أو حتى مليارات أضعاف كتلة الشمس. ومن المفارقات في الفيزياء الفلكية أن شيئًا بهذا الإظلام يمكن أن يسبب هذا الكم الهائل من الضوء، ومجرَّتنا تؤوي ثقبًا أسود هائلًا، مظلمًا لأنه ينام بين الوجبات، وقد اكتُشف من خلال سرب النجوم التي تدور حوله بسرعات تبلغ ملايين الأميال في الساعة.

توقع المنظرون أن جميع المجرَّات يجب أن تحتوي على ثقوب سوداء ضخمة، وبمساعدة أدوات مثل تلسكوب هابل الفضائي، أكد علماء الفلك هذا التنبؤ، وحددوا مواقع ثقوب سوداء كانت غير نشطة ومظلمة، وغيرها من التي تستهلك الغاز بشراهة وتسطع بوضوح. كما حددوا كتل آلاف من الثقوب السوداء، وأزال هذا البحث الصدمة والرهبة الناجمتين عن الثقوب السوداء، ومنحها جوًّا من الحتمية؛ الأمر الذي لا يجعلها أقل إثارة للدهشة.

حان الوقت الآن لاستكشاف آثار الثقوب السوداء، وسنتناول قصة حياتها ودورها في الكون المتطور، عائدين إلى لحظة الانفجار العظيم. كما سنتعرف على كيفية محاكاتها باستخدام الكمبيوتر، ونتساءل عمَّا إذا كان يمكن إنشاؤها في مختبر أم لا. وسنتعرف أيضًا على ما إذا كان يمكن استخدامها لاختبار نظرية الجاذبية، وكيفية اكتشاف التموجات في الزمكان التي تحدث عند اندماجها. وأخيرًا، سوف نلقي نظرة على مصير الثقوب السوداء على مدى الفترات الزمنية الكونية شبه اللانهائية.

الجزء الثاني

ماضي الثقوب السوداء وحاضرها ومستقبلها

ما قصة حياة الثقوب السوداء؟ يتوقع علماء الفلك أن بعض الثقوب السوداء ربما يكون قد نشأ بعد الانفجار العظيم مباشرة، عندما كان الكون الوليد ساخنًا وكثيفًا، ومنذ ذلك الحين تشكلت الثقوب السوداء الصغيرة مع موت النجوم الضخمة، ونمت الثقوب الكبيرة من خلال التهام الغاز القابع في مراكز المجرَّات وعن طريق الاندماج عند اندماج المجرَّات. في الجزء الثاني من هذا الكتاب سنلقي نظرة على كيفية تكوُّن الثقوب السوداء ذات الأحجام المختلفة ونموها. والآن، بعدما تخطى وجودها حاجز الشك، يصمم علماء الفلك عمليات رصد لاستكشاف أفق الحدث على نحو أكثر قربًا. كما تعلَّم الباحثون أيضًا كيفية استكشاف خصائص الثقوب السوداء بأمان عبر المحاكاة الحاسوبية.

إن الثقوب السوداء هي الدليل الأكيد الدافع لإثبات نظرية الجاذبية؛ فهي تسمح لنا بوضع النسبية العامة تحت الاختبار كما لم يحدث من قبل، وستنبع معظم الإثارة في أبحاث الثقوب السوداء في العِقد القادم من اكتشاف موجات الجاذبية؛ أي تموجات الزمكان والتي تمثل التنبؤ الرئيسي الذي خرجت به النسبية العامة. عندما اكتُشفت الثقوب السوداء المندمجة لأول مرة قبل بضع سنوات، أُطلق مجال جديد للفيزياء الفلكية، ستتمكن أجهزة كشف موجات الجاذبية قريبًا من اكتشاف عمليات اندماج الثقوب السوداء في أرجاء الكون المرصود، بحيث يُكتشف حدث كل أسبوع، وإذا ظل البشر على قيد الحياة لهذه الفترة الطويلة، فسيحصل أحفاد أحفادنا على رؤية قريبة لاندماج الثقب الأسود القابع في مركز مجرتنا مع الثقب الأسود المماثل القابع في مجرَّة أندروميدا.

ثم نختتم بالنظر في كيفية نمو الثقوب السوداء ونشأة حاجتها للتغذية في نهاية المطاف، مع توسع الكون وتبدد المجرَّات، وكيف أنه حتى أكبر الثقوب السوداء سوف يتبخر ذات يوم في صورة همس من إشعاع هوكينج، فلا شيء يدوم إلى الأبد، لا الكون أو الثقوب السوداء.


مكتبة
t.me/t_pdf


مكتبة
t.me/t_pdf

الفصل الخامس

حيوات الثقوب السوداء

في الكون ثقوب سوداء تتراوح أحجامها من أجرام بحجم مدينة ذات كتلة تساوي كتلة نجم إلى أجرام بحجم النظام الشمسي ذات كتلة تساوي كتلة مجرَّة، كيف تُولد الثقوب السوداء وكيف تعيش حياتها؟ تبدأ القصة بالانفجار العظيم، وتتواصل بموت عنيف للنجم وتجمع الكتلة في مراكز المجرَّات. ومن خلال مزيج من عمليات الرصد والنظريات والمحاكاة الحاسوبية ومجموعة من الافتراضات، جمَّع علماء الفلك تاريخ الثقوب السوداء، حتى إنهم فكروا في مسألة ما إذا كان الكون بحد ذاته عبارة عن ثقب أسود.

بذور الكون

كان الكون في بدايته فوضويًّا غير منظم، ورغم أن الكون كان يزداد تكتُّلًا بينما تشكل الجاذبية الكواكب والنجوم والمجرَّات، فإنه لم يكن كامل التمهيد، فبعد الانفجار العظيم مباشرة كانت هناك تباينات طفيفة، وبما أن متوسط كثافة الكون كان مرتفعًا للغاية، كانت الجاذبية في هذه المناطق قوية للغاية. وتعود بذور تكوين المجرَّات إلى هذا الكون المبكر. ولكن هذا ليس كل شيء؛ ففي العام نفسه الذي تنبأ فيه بالإشعاع الذي يحمل اسمه، قدم ستيفن هوكينج وأحد طلابه، برنارد كار، ورقة بحثية عن الثقوب السوداء التي ربما تكونت في الكون المبكر: الثقوب السوداء البدائية،[1] وفيها أشار الباحثان إلى أنه حتى لو كانت تباينات الكثافة التي حدثت بعد الانفجار العظيم صغيرة في المتوسط، ربما تكون الاختلافات في بعض المناطق كبيرة بما يكفي لإنشاء قوة جذب ثقالي تجاوزت قوة التمدد الكوني، وربما حدث انضغاط ثقالي في تلك المواقع، وربما تشكل ثقب أسود. ويمكن لهذه العملية أن تصنع ثقوبًا سوداء بأي كتلة تقريبًا، هل يمكن أن تكون ثقوب هوكينج السوداء البدائية هي بذور الكون؟

ربما تشكلت الثقوب السوداء الأولى في «زمن بلانكت»، وهي فترة $١٠^{-٤٣}$ ثوانٍ تلت الانفجار العظيم، عندما كان قطر الكون $١٠^{-٣٥}$ أمتار.[٢] ومن الممكن أن تكون للثقوب السوداء التي تشكلت آنذاك كتلة تبلغ $١٠^{-٨}$ كيلوجرامات، وهي نحو كتلة ذرة من الغبار. ولا يمكن لهذه الثقوب السوداء المبكرة أن تنمو بسبب التمدد السريع للكون، ولذلك فقد تبخرت بسرعة. بل إن أي ثقب أسود تشكل بعد أقل من $١٠^{-٢٣}$ ثوانٍ من الانفجار العظيم بكتلة تقل عن $١٠^{١٢}$ كيلوجرامات لابد أنه قد تبخر بالفعل، ولكن الثقوب السوداء ذات الكتلة الأكبر والتي تشكلت بعد ذلك قد تبقى حتى يومنا هذا. ويمكن أن يكون للثقب الأسود البدائي الذي تشكل بعد ثانية واحدة من الانفجار العظيم كتلة لا تقل عن ١٠٠ ألف كتلة شمسية، وهذا ليس أقل بكثير من كتلة الثقب الأسود الضخم الموجود في مركز درب التبانة.

ثمة نظرية أخرى مثيرة للاهتمام تقول إن الثقوب السوداء البدائية قد تستمر في شكل غير متوقع، على مدار الأربعين سنة الماضية، ظل علماء الفلك يتعاملون مع مشكلة المادة المظلمة، فالنجوم في المجرَّات بجميع أنواعها تتحرك بسرعة كبيرة بحيث لا يمكن تفسيرها من خلال جاذبية النجوم نفسها، حيث يبدو أن هناك مكوِّنًا إضافيًّا للكتلة، يزيد بمقدار ٥ أو ٦ مرات عن مجموع كتلة كل النجوم، وهذا هو ما يجمع المجرَّات معًا.[٣] تفرض هذه المادة المظلمة جاذبية، ولكن لا ينبعث منها أي ضوء أو تتفاعل مع الإشعاع بأي شكل من الأشكال، وتُظهر بيانات التعديس الثقالي أن المادة المظلمة تملأ الفراغ بين المجرَّات. ماذا لو كانت المادة المظلمة مصنوعة من الثقوب السوداء البدائية؟ تلك احتمالية جذابة. من الناحية النظرية، ينبغي العثور على الثقوب السوداء البدائية، التي هي كما المادة المظلمة، توجد في جميع أنحاء الكون، وافتراض أنها مصدر للمادة المظلمة يتجنب ابتكار جسيم أساسي جديد خارج الفيزياء القياسية (ولم تره بعد مُعجِّلات الجسيمات).

لسوء الحظ استبعدت عمليات الرصد الدقيقة معظم الطرق التي قد توجد بها الثقوب السوداء البدائية، بما في ذلك وجودها في صورة المادة المظلمة. عندما يتبخر ثقب أسود، فإنه يُطلق سيلًا من أشعة جاما، وبحلول ثمانينيات القرن العشرين كان لدى ناسا أقمار صناعية لرصد أشعة جاما في المدار حول الأرض، لكنها لم ترصد الأثر المتوقع. يستبعد التعديس الثقالي الثقوب السوداء الموزَّعة على نطاق واسع والتي تتراوح كتلتها من كتلة مجرَّة وصولًا إلى كتلة الأرض. وأغلقت الأعمال النظرية

الحديثة الباب في وجه آخر نافذة كتلة - من $١٠^{١٤}$ إلى $١٠^{٢١}$ كيلوجرامات، أو من إجمالي كتلة الكربون في الغلاف الجوي للأرض حتى كتلة قمر صغير في النظام الشمسي.[٤] لا يمكن أن تكون الثقوب السوداء البدائية متوفرة بما يكفي لتفسير المادة المظلمة، لكن هذا لا يعني أنها لم توجد في شكل ما. وتتنبأ بها النظرية الكونية، كما أن لها القدرة على تيسير فهمنا للكون المبكر، وهكذا الأبحاث مستمرة.

النور الأول والظلمة الأولى

بعد ثوانٍ قليلة من الانفجار العظيم، لم تعد الظروف مواتية لتشكيل الثقوب السوداء البدائية. كان الكون في تلك اللحظة مرجلًا رائقًا تقريبًا من الجسيمات عالية الطاقة والفوتونات، مع تباين في الكثافة يقل عن ٠,٠٠١٪ من مكان إلى آخر. وبعد دقائق قليلة من الانفجار العظيم، انخفضت درجة الحرارة إلى النقطة التي يمكن عندها أن تتشكل النُوى الذرية. وحولت عمليات الاندماج النووي ربع كتلة الكون من الهيدروجين إلى هيليوم، مع وجود كميات ضئيلة من الليثيوم ونظائر الهيدروجين والهيليوم. ولم يستغرق ذلك أكثر من الوقت اللازم لسلق بيضة. كانت درجة الحرارة ١٠ ملايين درجة، كنت وقتها ستحتاج إلى منظار بالأشعة السينية لرؤية الكون.[٥]

واصل الكون تمدده وانخفاض حرارته، ووقع الحدث المهم التالي بعد نحو ٥٠ ألف سنة، عندما كانت كثافة طاقة المادة والإشعاع متساويتين. بعد ذلك، انخفضت كثافة طاقة الإشعاع بسرعة أكبر من كثافة طاقة المادة بينما انزاحت الفوتونات نحو الأحمر بسبب التمدد. ونتيجة لذلك، فرضت الجاذبية قبضتها، وبدأت الاختلافات الدقيقة في الكثافة في الازدياد. كانت درجة حرارة الكون ١٠ آلاف درجة. لو كان هناك أي شخص يشاهده وقتها، لرآه متوهجًا باللون الأزرق. وبعد نحو ٤٠٠ ألف سنة من الانفجار العظيم، انخفضت درجة الحرارة إلى ٣٠٠٠ درجة وانضمت الإلكترونات إلى النُوى لتشكيل ذرات مستقرة. وتحرك الإشعاع بحريَّة لأول مرة، وانقشع «الضباب الأحمر»، وظهرت البنيات الوليدة.

كان الكون لا يزال في أيامه الأولى؛ فمقارنة بعمر ١٣,٨ مليار سنة، فإن ٤٠٠ ألف سنة تمثل طرفة عين، فهي تعادل الساعات العشر الأولى من حياة الإنسان الذي يبلغ من العمر أربعين عامًا. ومع تمدده، أصبح الكون خارج نطاق البصر، وانتقل الإشعاع

من الأحمر الباهت إلى الأشعة تحت الحمراء غير المرئية. كانت هذه بداية العصور المظلمة.[6] استمرت العصور المظلمة حتى تشكلت النجوم والمجرَّات الأولى، بعد ١٠٠ مليون سنة أو نحو ذلك بعد الانفجار العظيم، ومن ثمَّ فإن هذه الحقبة بأكملها تقع ضمن الواحد بالمائة الأولى من عمر الكون.

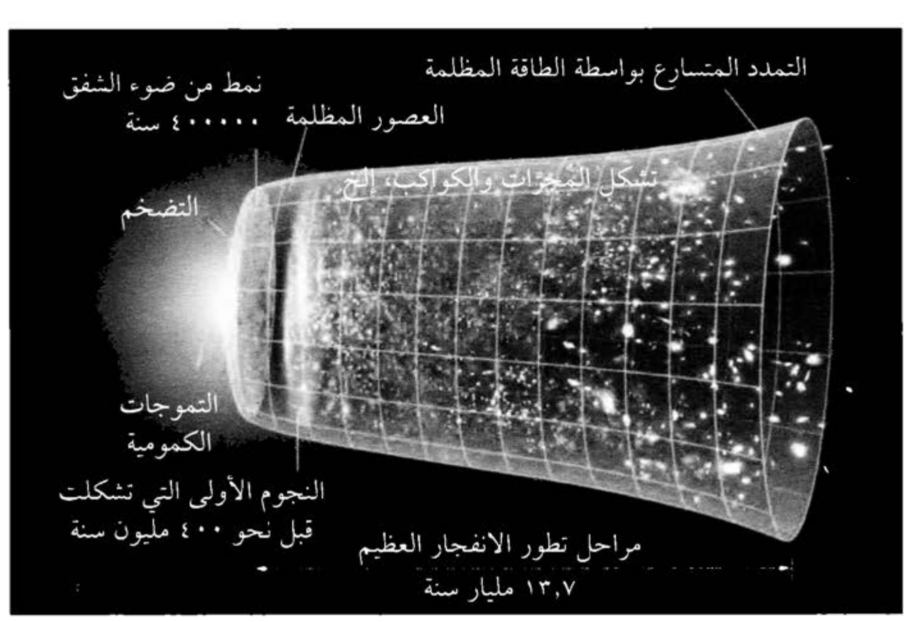
من المثير للاهتمام أنه على الرغم من أن الجزء الأول من عمر الكون كان مظلمًا، لكنه لربما لم يخلو من حياة. ففي الفترة ما بين الـ ١٠ و٢٠ مليون سنة بعد الانفجار العظيم، كانت درجة حرارة الكون تتراوح ما بين نقطة غليان الماء ونقطة تجمده. إن الكون في وقتنا الحاضر شديد البرودة، والحياة البيولوجية كما نعرفها لا يمكن أن توجد إلا في المناطق الضئيلة الصالحة للعيش بالقرب من النجوم، أو ربما في مواقع أكثر برودة تحت سطح كوكب أو قمر حيث يظل الماء سائلًا بسبب الضغط الناجم من الأعلى والحرارة الإشعاعية من أسفل. ولكن مر قبل ذلك وقت كانت فيه درجة حرارة الكون بأكمله صالحة للعيش. ولكن الأمر غير الواضح هو ما إذا كانت النجوم الأولى النادرة قد صنعت ما يكفي من الكربون لتكوين الحياة البيولوجية وعناصر ثقيلة كافية لتشكيل كوكب تسكنه هذه الحياة.[7] وثمة شكوك أيضًا حيال أن تكون ٢٠ مليون سنة وقتًا كافيًا لتتطور الحياة من المكونات الكيميائية البسيطة.

تتمحور بعض أهم الأسئلة في علم الكونيات حول العصور المظلمة. متى انتهت؟ ما الذي تشكل أولًا، النجوم أم المجرَّات؟ كيف تأثرت عمليات تشكلها بغياب العناصر الثقيلة؟ ما أفضل طريقة لرصد أول ضوء في الكون؟ والسؤال الأهم بالنسبة لكتابنا: أي نوع من الثقوب السوداء تشكَّل أولًا؟

لنفترض للحظة أن المادة المظلمة تمثل نوعًا جديدًا من الجسيمات الأساسية التي تنبأت بها النظريات التي توحد قوى الطبيعة الثلاث، وكعنصر في علم الكونيات، تعد المادة المظلمة بسيطة إلى حدٍّ ما، فهي تفرض جاذبية ولكنها لا تتفاعل مع الضوء أو أي شكل آخر من أشكال الإشعاع.[8] وتوجد مادة مظلمة تساوي ستة أضعاف المادة العادية؛ لذلك فهي تحدد تشكيل البنية في الكون. عندما تتجمع المادة المظلمة من خلال الجاذبية، تبدأ كتل صغيرة أو منخفضة الكتلة في الظهور. كانت البنى الأولى التي تشكلت بعد ١٠٠ مليون سنة من الانفجار العظيم – أي في نهاية العصور المظلمة – تتكون من $١٠^{٦}$ كتل شمسية من المادة المظلمة، وهذا ما يساوي كتلة مجرَّة قزمة صغيرة في عالمنا اليوم. ومع مرور الوقت اندمجت هذه الكتل لتشكيل كتل أكبر وأكبر.

وتحتوي كل كتلة من المادة المظلمة على «بركة» من المادة العادية تساوي كتلتها سدس كتلة المادة المظلمة، وينهار هذا الغاز في مركز جاذبية «حفرة» المادة المظلمة. وعندما ينهار، تتشكل النجوم ويصدر أول ضوء، وفي هذا السيناريو «التصاعدي»، تتشكل الأجرام الصغيرة قبل الأجرام الكبيرة؛ حيث تتشكل النجوم قبل المجرَّات (شكل ٣٧).[٩]

كان الكون مختلفًا تمامًا مع انتهاء العصور المظلمة وانبعاث أول ضوء؛ فقد كان أصغر بثلاثين مرة، وأكثر سخونة بثلاثين مرة، وأكثر كثافة بثلاثين ألف مرة ممَّا هو عليه الآن. أما الفرق الرئيسي الآخر فقد تمثل في عدم وجود عناصر أثقل من الهيدروجين أو الهيليوم. تعتمد عملية تكوين النجوم على طرد الحرارة بعيدًا بحيث يمكن للجاذبية أن تجعل سحابة الغاز تنضغط. يمتلك الكربون والأكسجين تحولات طيفية تحمل الطاقة بعيدًا بكفاءة عالية. ويعني عدم وجود هذه العناصر في الكون



شكل ٣٧: تمثيل ثنائي الأبعاد لتطور الكون من لحظة الانفجار العظيم قبل ١٣٫٧ مليار سنة. إن التمدد الأُسِّي المبكر يمهد الطريق لتمدد أبطأ. كان الكون مظلمًا من ٤٠٠ ألف سنة حتى بضع مئات من ملايين السنين بعد الانفجار العظيم، عندما تشكلت النجوم الأولى والثقوب السوداء. ونمت الثقوب السوداء الضخمة بسبب اندماج المجرَّات وسقوط الغاز في هذه المجرَّات. وفي آخر ٥ مليارات سنة، تسارع التمدد بسبب الطاقة المظلمة.

«ناسا/فريق مسبار ويلكينسون لقياس التباين الميكروي»

في أيامه المبكرة أن السحب المكوِّنة للنجوم كانت أكثر سخونة وكثافة. في كوننا المحلي الحالي، يبلغ الحد الأقصى لكتلة النجوم نحو ١٠٠ ضعف كتلة الشمس. أما في بداية الكون، فربما تراوحت كتلة النجوم الأولى ما بين ٢٠٠ و٣٠٠ ضعف لكتلة الشمس. منذ وقت طويل، كانت كتل المادة المظلمة ذات الكتلة التي تساوي مليون كتلة شمسية تشكل نجومًا كانت في المتوسط أكبر بعشرات المرات من النجوم التي تتشكل الآن في جوار الشمس.

كانت حياة النجوم الأولى قصيرة؛ فقد قضت على وقودها النووي في غضون بضعة ملايين سنة، في المحاكاة الحاسوبية، تنفجر النجوم الأكثر ضخامة وتتحول إلى مستعرات عظمى، ولا تترك شيئًا خلفها، أو تنضغط مباشرة مستحيلة ثقوبًا سوداء بكتلة تتراوح ما بين ٢٠ و١٠٠ ضعف لكتلة الشمس. وعلى غرار النجوم الأولى نفسها، فإن الثقوب السوداء التي تتركها وراءها أكثر ضخامة من الثقوب السوداء التي نجدها بالقرب من درب التبانة.

كل ما قرأته للتو يعتمد على النظريات والمحاكاة الحاسوبية. ماذا عن البحث الرصدي عن الضوء الأول؟ توجد طريقتان لفعل هذا، وكلتاهما تشبه البحث عن إبرة في كومة قش؛ لأن النجوم الأولى نادرة والكون يشكِّل النجوم على نحو متواصل منذ ١٤ مليار عام. تتمثل إحدى الطريقتين في البحث عن النجوم التي تتكون من الهيدروجين والهيليوم فقط في درب التبانة، مما يعني أنها تتشكل من غاز لم «يتلوث» بأي جيل سابق من النجوم. في عام ٢٠١٢، تابعت مجموعة في المرصد الأوروبي الجنوبي نجمًا خافتًا من «مسح سلون الرقمي للسماء»، ووجدت أنه يحتوي على كمية من العناصر الثقيلة تقل بمقدار ٢٠٠ ألف مرة عمَّا تحتويه الشمس.[10] ولأنه يبلغ من العمر ١٣ مليار عام، فإنه يعد أفضل مرشح ليكون نجمًا بدائيًّا.[11]

أما الطريقة الأخرى فتتمثل في إيجاد النجوم التي لا تحتوي على عناصر ثقيلة في مجرَّة بعيدة، في عام ٢٠١٥، اكتشفت مجموعة أوروبية أخرى نجومًا بدائية في مجرَّة لها انزياح نحو الأحمر يُقدَّر بـ $z = 6.6$، وهذا يعني أن تاريخ انبعاث الضوء يرجع إلى أقل من مليار سنة بعد الانفجار العظيم. أطلق ديفيد سوبرال من جامعة لشبونة - الباحث الرئيسي - على المجرَّة اسم «سي آر ٧» (CR7)، اختصارًا لمسمى «مجرَّة الانزياح الأحمر ٧» (Cosmos Redshift 7)، وكذلك أيضًا تيمنًا بلاعب كرة القدم المفضل لديه: كريستيانو رونالدو. قال سوبرال: «لا يمكن أن أشعر بإثارة تضاهي إثارة

هذا الاكتشاف. فهذا هو أول دليل مباشر على النجوم التي سمحت لنا جميعًا بأن نوجد هنا في هذا الكون بأنها قامت بتصنيع عناصر ثقيلة وتغيير تكوين الكون».

يولد الثقب الأسود من رحم كارثة نجمية

في يوليو من عام ١٩٦٧، رصد قمران صناعيان من أقمار «فيلا» الأمريكية نبضات أشعة جاما. كانت هذه الأقمار الصناعية اختراعًا من الحرب الباردة، وأطلقت لرصد الانتهاكات السوفيتية لمعاهدة حظر التجارب النووية[١٢] التي وُقِّعَت في عام ١٩٦٣. لم يكن العامة يعرفون هذا في ذلك الوقت، لكن الحكومة الأمريكية كانت على أهبَّة الاستعداد للحرب.

لحسن الحظ، أظهر فريق من مختبر لوس آلاموس الوطني أن ومضات أشعة جاما تختلف عن آثار الأسلحة النووية، واستنتج الفريق أن مصادر هذه الأشعة موجودة خارج النظام الشمسي. في عام ١٩٧٣، رُفعت السرية عن هذا الاكتشاف ونُشر كورقة بحثية.[١٣] مع ذلك زاد غموض هذا الإشعاع؛ ففي كل يوم وفي مكان ما في السماء يحدث انفجار لأشعة جاما. ولمدة بضع ثوانٍ، كانت هذه المصادر تسطع عن بقية الكون بأكمله بأشعة جاما. ولكنها كانت تتلاشى بسرعة أيضًا، حيث كانت تستمر من بضع أجزاء من الثانية إلى نحو ثلاثين ثانية. كانت المواضع المقاسة بواسطة أقمار أشعة جاما غير مرتبة بدرجة لم تسمح بمتابعة هذه الانبعاثات، وكان توزيعها عشوائيًّا؛ لذا لم يمنحنا أي فكرة عن مصدرها.

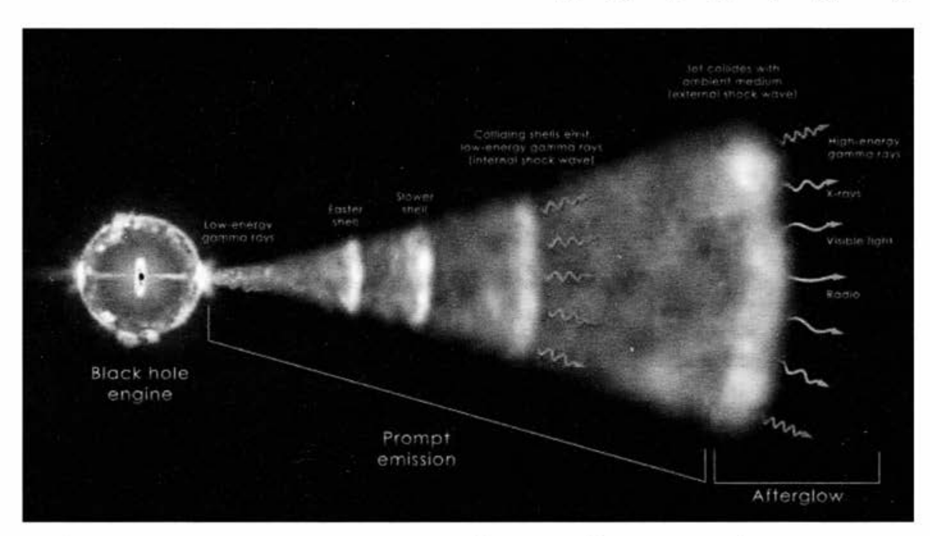
حدث تقدم كبير للغاية في أواخر تسعينيات القرن العشرين، عندما بدأ قمر صناعي للأشعة السينية سريع الاستجابة في تسجيل البيانات في المدار. كان هذا القمر يستطيع الدوران حول محوره بسرعة لالتقاط الأشعة السينية منخفضة الطاقة من حدث انبعاث أشعة جاما، وقد سمحت مواقع الأشعة السينية الدقيقة لعلماء الفلك البصري برصد الشفق المتلاشي. وأظهر التحليل الطيفي أن الأجسام المسئولة عن هذه الانبعاثات كانت في مجرَّات بعيدة، تبعد مليارات السنين الضوئية عن الأرض. كانت هذه المسافات الكبيرة تعني أن انفجارات أشعة جاما لا بد أن تكون شديدة السطوع. ثمة حدث في عام ٢٠٠٨ كان مرئيًّا للعين المجردة لمدة ثلاثين ثانية، على الرغم من حدوثه على مسافة تساوي نصف الكون. انبعث الضوء الذي ظهر لفترة

وجيزة في عام ٢٠٠٨ قبل تشكل الأرض بثلاثة مليارات سنة.[١٤] وكان انفجار آخر قد شوهد عام ٢٠٠٩ في مجرَّة لها انزياح نحو الأحمر يُقدَّر بـ $z = 8.2$، ومن ثمَّ حدث هذا الانفجار عندما كان عمر الكون يمثل ٤٪ فقط من عمره الحالي.[١٥] وأصدر أقوى الانفجارات طاقة تزيد بمقدار ١٠٠٠ مرة عن المستعرات العظمى، وهو ما يصل إلى ١٠^٤٤ جول. وهذا هو ناتج الطاقة الذي تشعه الشمس طوال حياتها، وقد انبعث في ثانية وليس على مدى ١٠ مليارات سنة!

عندما يحدث انفجار أشعة جاما، فإن التقاط الشفق البصري هو الطريقة الوحيدة لقياس الانزياح نحو الأحمر وشدة السطوع، وهو ما يمكن أن يساعد في أن نعرف عمر الجرم ويوجهنا نحو تحديد حجمه. قبل بضع سنوات، كنت في تلسكوب جبل هوبكنز متعدد المرايا ذي القطر الذي يبلغ ٦٫٥ أمتار في أريزونا عندما تلقيت تنبيهًا عبر الإنترنت، رصد قمر «سويفت» التابع لناسا انفجار أشعة جاما ووُجِهَت الدعوة في جميع أنحاء العالم لرصد الطيف. كانت الساعة الثالثة صباحًا ولكنني وضعت قهوتي جانبًا؛ فلا شيء يوقظك مثل مطاردة كارثة نجمية. وفي غضون دقائق كنا في الموقع. لم يكن هناك شيء ظاهر على شاشة التلفزيون؛ لذلك فقد كنا نسير على غير هدى نأمل في وجود إشارة. في اليوم التالي، أظهرت البيانات المختزلة أثرًا متقلبًا مع إشارة لخطوط الانبعاث، لكنها لم تكن قوية بدرجة كافية لقياس الانزياح نحو الأحمر، وفي الليلة التالية كانت قد تلاشت إلى حد لا يسمح برصدها. في علم الفلك عليك أحيانًا أن تكتفي بإثارة المطاردة وحسب.[١٦]

يعتقد علماء الفلك أن انفجارات أشعة جاما هي بطاقة اتصال لثقب أسود تم تشكيله حديثًا.[١٧] تنقسم آلاف الأحداث التي خضعت للدراسة حتى الآن إلى مجموعتين، وهما: أحداث طويلة المدى عالية اللمعان، وأحداث قصيرة المدى منخفضة اللمعان. ترجع معظم الانفجارات الأكثر سطوعًا إلى انهيار النواة الدوارة لنجم ضخم، والذي عادة ما يكون أكبر من ٣٠ ضعفًا لكتلة الشمس، وهذا يشكل ثقبًا أسود. وتسقط المادة القريبة من قلب النجم على الثقب الأسود وتدور في قرص مزود. ويشكل الغاز الساقط نفاثتين مزدوجتين على طول محور الدوران، ويتحرك بسرعة ٩٩٫٩٩٪ من سرعة الضوء وتشق طريقها عبر سطح النجم لتصدر أشعة جاما. تُطلق الكثير من طاقة الجاذبية في شكل نيوتريونات بدلًا من فوتونات (شكل ٣٨). ويُعتقد أن الانبعاث الأسرع ناتج عن اندماج نجمين نيوترونيين أو اندماج نجم نيوتروني وثقب أسود. وأي

حالة من هاتين الحالتين تؤدي إلى ثقب أسود واحد. وتُطلق معظم طاقة الاندماج في شكل إشعاع جاذبية؛ أي تموجات في الزمكان تُشع نحو الخارج بسرعة الضوء كما تنبأت النسبية العامة. وتشكل المادة التي تتساقط على الثقب الأسود المتشكل حديثًا قرصًا مزودًا وتطلق كمية كبيرة من الطاقة.



شكل ٣٨: يمكن أن نستدل على أن الثقب الأسود قد وُلِدَ ولادة عنيفة من خلال انفجار أشعة جاما. فمع انبعاث الطاقة من النفاثتين النسبيتين على طول المحور القطبي لدوران الثقب الأسود، تولد موجة الانفجار إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا عالي الطاقة على نحو شديد. ولبضع ثوانٍ، تعد مثل هذه الانفجارات الأجرام الأكثر سطوعًا في الكون بالنسبة لأشعة جاما، والتي يمكن رصدها من على بُعد مليارات السنين الضوئية.

«ناسا/فريق تلسكوب سويفت»

يعد المستعر فوق العظيم (هايبرنوفا) نوعًا أكثر تطرفًا من صور تشكل الثقوب السوداء؛ حيث يطلق طاقة أكبر بمئات أو آلاف المرات من الموت الطبيعي لنجم ضخم في صورة مستعر أعظم. وحامل الرقم القياسي هو انفجار تم رصده في عام ٢٠١٦ وكان أكثر سطوعًا بمقدار نصف تريليون مرة من الشمس.[١٨] تخيَّل ضوءًا يساوي ٢٠ ضعفًا لضوء جميع نجوم درب التبانة، محبوسًا في مساحة قطرها ١٠ أميال. لقد كان هذا الانفجار هو أكبر انفجار مسجَّل منذ الانفجار العظيم، كما يمثل حقيقة محيرة للعقل تتحدى أي نظرية فيزيائية للطاقة.

هذا الانفجار الهائل يثير سؤالًا مزعجًا، ألا وهو: هل الأرض مُعرَّضَة لخطر كارثة نجمية كهذه؟ بعبارة أخرى، على الرغم من أنه لا ينبغي لنا أن نقلق بشأن الوقوع في ثقب أسود، فهل يجب علينا القلق بشأن وصول ثقب أسود إلينا والتهامنا؟ الخبر السار هو أن هذه الأحداث نادرة، فهي تحدث بمعدل نحو حدث واحد في كل مجرَّة واحدة في كل مليون سنة. كما أن الإشعاع يتركز في شعاعين مزدوجين، ويكون اتجاه هذه الانفجارات عشوائي في الفضاء، ومن ثم فإن ٩٩٫٥٪ منها سيخطئنا. وهذا يقلل من معدل التعرض لأحدها إلى واحد في كل مجرَّة في كل ٢٠٠ مليون سنة، أما الأخبار السيئة فهي أننا إذا وقعنا في خط النار وكان الانفجار على مقربة بضعة آلاف سنة ضوئية، فسوف تغرق الأرض ومحيطها الحيوي في إشعاعات عالية الطاقة. وسوف تستنفد أشعة جاما طبقة الأوزون بنسبة ٧٥٪، ممَّا يرفع معدلات الطفرات بصورة كبيرة. ويصعب تقدير التأثير الكلي على النظام الإيكولوجي، لكن هناك مجموعة تقول إن الانقراض الجماعي في العصر الأوردوفيشي المتأخر قبل ٤٥٠ مليون عام كان سببه انفجار أشعة جاما.[19] إن الدليل الناتج عن الانقراض يتوافق مع استنفاد الأوزون وفقدان الأنواع التي تعيش على السطح، ولكن لا توجد طريقة تُمكِّن علماء الفلك من تحديد الانفجار القديم؛ لأن الثقب الأسود هو كل ما تبقى.

ثمة أدلة أكثر إثارة للذهول على أن حدثًا أقل شدة قد وقع خلال التاريخ المسجل، ففي عام ٧٧٤ ميلادي، كان العالم الغربي عبارة عن مجموعة من الدويلات الصغيرة المتحاربة. وكان شارلمان يقوي مملكته بغزو توسكانا وكورسيكا. وفي اليابان، حيث كانت البوذية تنتشر سريعًا لتصبح ديانة الدولة، كان للإمبراطورة كوكن مليون مخطوطة صلاة، وهي تعد من أقدم الأعمال المطبوعة في العالم. وتُظهِر عمليات التأريخ بالكربون أن الأشجار التي قُطعَت لصنع هذه اللفائف شهدت زيادة حادة في نسبة الكربون -١٤ إلى الكربون -١٢.

وهذه الزيادة تمثل الدليل الأول لإظهار أن الأرض تعرضت للإشعاع الناتج عن انفجار أشعة جاما منذ نحو ١٢٥٠ عامًا. والكربون -١٤ مشع ويتحلل إلى نيتروجين، ويرجع سبب وجوده في الأصل إلى اصطدام الأشعة الكونية، وهي جسيمات عالية الطاقة من الفضاء، بالنيتروجين في الجو. تحافظ هذه العملية على وجود مستوى منخفض ثابت من الكربون -١٤، ولكن الزيادة التي حدثت بمعامل قدره ١٠، كما لوحظ في اللفائف، لا بد لها من سبب خارجي إضافي. ويتمثل الدليل الثاني في زيادة

الكربون -١٤ في الأشجار في أوروبا وأمريكا، على الرغم من صعوبة تحديد تاريخها. ويتمثل الدليل الثالث في حدوث قفزة صغيرة في نسبة البريليوم -١٠ المشع في ذلك الوقت تقريبًا.[٢٠] يُصنع البريليوم -١٠ عندما تصطدم الجسيمات عالية الطاقة بسطح مكشوف، إذ يستخدم تركيزه للتأريخ للزحف الجليدي وتدفقات الحِمَم البركانية وغيرها من الأحداث الجيولوجية في الصخور التي قد يبلغ عمرها ٣٠ مليون عام. لا شيء من هذا يمكن تفسيره بواسطة التوهج الشمسي، ولا يمكن تفسيره من خلال المستعرات العظمى؛ لأن أي مستعرات عظمى قريبة كانت ستظهر في السماء نهارًا ولم يتم تسجيل أيٍّ منها في مخطوطات القرون الوسطى. وبهذا لا يتبقى لدينا سوى انفجار أشعة جاما. فمن مسافة نحو ٥٠٠٠ سنة ضوئية، كان من الممكن أن يلقي الانفجار ٢٠٠ ميجا طن من أشعة جاما في الغلاف الجوي للأرض. وكان الشفق سيستمر بضعة أيام فقط، على الرغم من أنه كان من الممكن أن يصير مرئيًّا للعين المجردة، ومن المحتمل ألَّا يكون أحد قد لاحظه أو فكر في تسجيله.

وفي الوقت نفسه، يراقب علماء الفلك نجمًا ضخمًا يسمى «دبليو آر ١٠٤» (WR 104)، ويبعد ٨٠٠٠ سنة ضوئية عن الأرض، ومن المحتمل أن يموت بانهيار عنيف في وقت ما خلال بضع مئات الآلاف من السنين القادمة، ولا يمكننا تحديد اتجاه الانفجار في الفضاء؛ لذلك عندما يحدث ذلك، علينا أن نأمل ألَّا تكون إحدى نفاثتيه القويتين في اتجاهنا. لكن تحديد الوقت الفلكي غير دقيق بدرجة كافية، ممَّا يجعلنا غير مطمئنين للنطاق الزمني؛ فربما ينفجر قريبًا. ولكن في الوقت الحالي لدينا أشياء أهم من ذلك يمكن أن تطيِّر النوم من أعيننا.

العثور على الروابط المفقودة

تحدثنا عن نوعين مختلفين من الثقوب السوداء؛ يتشكل أحدها من موت نجم ضخم، عندما يترك نجم بدأ حياته بكتلة تتراوح ما بين ٨ و١٠٠ ضعف لكتلة الشمس، جرمًا مظلمًا تتراوح كتلته بين ٣ و٥٠ ضعفًا لكتلة الشمس. أما الشكل الآخر فيتشكل في مركز المجرَّة، وتتفاوت كتلته في نطاق مقداره عدة ملايين من أضعاف كتلة الشمس في المجرَّات الحلزونية غير النشطة، مثل درب التبانة، وتصل إلى عدة مليارات من أضعاف كتلة الشمس في المجرَّات الإهليلجية العملاقة، مثل «ميسييه ٨٧» (M87). وهذا يترك

فجوة هائلة في الكتلة: كتلة الشمس مضروبة في ١٠٥، أي من عشرة أضعاف الكتلة الشمسية إلى بضعة ملايين ضعف لها، لكن هل توجد ثقوب سوداء متوسطة الكتلة؟

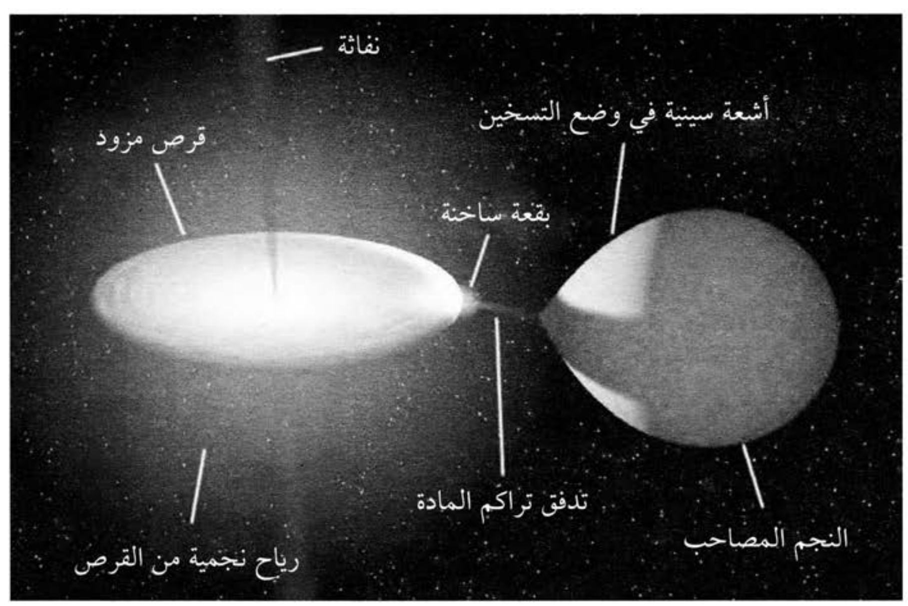
رصدت مجموعة صغيرة من الأجرام التي تسد هذه الفجوة من أسفل، تذكر أن آرثر إدنجتون قد وضع حد سطوع الثقب الأسود، كلما تغذت الثقوب السوداء على المادة على نحو أسرع، كانت أكثر سطوعًا. ولكن حتى لو كان هناك ثقب أسود يتغذى على الغاز الوفير من مصاحب في نظام ثنائي، فإن هناك حدًّا لسطوعه. وضغط الإشعاع الذي ينطلق من القرص المزود يتصدى لسحب الجاذبية في الثقب الأسود؛ لذا يحدث في وقت ما أن يضخ الغاز الزائد الذي يحاول السقوط في الثقب الأسود نحو الفضاء. وهذا ما يسمى «حد إدنجتون». قبل ثلاثين عامًا تم اكتشاف فئة نادرة من مصادر الأشعة السينية فائقة السطوع (ULXs)، وهي تضخ طاقة أشعة سينية أكثر بمليون مرة من الطاقة الكلية للشمس، كما أنها ساطعة بدرجة تكفي لرؤيتها في مجرَّات على بُعد ملايين السنين الضوئية. ووفقًا لحد إدنجتون، لا بد أن تكون هذه الثقوب السوداء أكبر بمئات أو آلاف المرات من كتلة الشمس، وهذه الكتلة تقع بالضبط في منتصف فجوة الكتلة.[٢١]

تعتبر ثنائيات الأشعة السينية الساطعة أمرًا مهمًا لسبب آخر؛ فبعضها يمثل نسخة مصغرة من الكوازارات. يقع النظام النجمي الثنائي الغريب «إس إس ٤٣٣» (SS 433) في كوكبة العقاب (Aquila)، ويبعد عنَّا ١٨ ألف سنة ضوئية. يدور نجم أزرق متضخم حول ثقب أسود كل ثلاثة عشر يومًا ويقوم بإلقاء الغاز على القرص المزود حول الثقب الأسود. يسقط بعض الغاز الساخن في الثقب الأسود بينما يتوجه الباقي إلى النفاثتين التوأمين على طول محور دوران الثقب الأسود، ويتحرك الغاز بمعدل ربع سرعة الضوء، ويغطي ميلًا واحدًا في ٢٠ ميكروثانية.[٢٢] يعتبر «إس إس ٤٣٣» نموذج للميكروكوازار microquasar (شكل ٣٩). يحتوي الميكروكوازار على جميع مكونات الكوازار - ثقب أسود دوار، وقرص مزود، وإشعاع شديد عالي الطاقة، ونفاثتان نسبيتان — ولكنه أصغر حجمًا بمليون مرة، لا يوجد سوى ١٠٠ ميكروكوازار معروفة في درب التبانة، ولكنها مفيدة جدًّا في تصميم وفهم الفيزياء الفلكية المتطرفة للكوازارات.[٢٣] إن الجدول الزمني لتغذية الكوازار أطول بكثير من عمر الإنسان، بينما بالنسبة إلى الميكروكوازار فإنه يمتد لبضع ساعات؛ لذلك يمكن رصده بسهولة.

ماذا عن الضغط على الفجوة من أعلى؟ دعنا نعد إلى فكرة رئيسية شاعت خلال العقود القليلة الماضية، مفادها أن لكل مجرَّة قلبًا مظلمًا، والكوازارات والمجرَّات

النشطة نادرة، أما الثقوب السوداء المركزية في معظم المجرَّات فهي غير نشطة في معظم الوقت؛ لذلك لا يمكن رصدها إلا من خلال تأثيرها على النجوم القريبة من مركز المجرَّة. عندما جمع علماء الفلك المزيد من البيانات حول الثقوب السوداء في المجرَّات القريبة، وجدوا ارتباطًا مثيرًا؛ يمكن التنبؤ بكتلة الثقب الأسود المركزي غير النشط بدقة من خلال انتشار السرعة - نطاق الحركة الذي يشير إلى الكتلة الكلية - للنجوم القديمة في المجرَّة.[٢٤] هذا الارتباط مُحيِّر؛ فهذه الثقوب السوداء تؤثر فقط على المناطق المركزية من المجرَّة، والنجوم في المجرَّة تفوقها بنسبة واحد إلى ٥٠٠. لماذا ترتبط هذه الكميات المتباينة ببعضها بعضًا؟

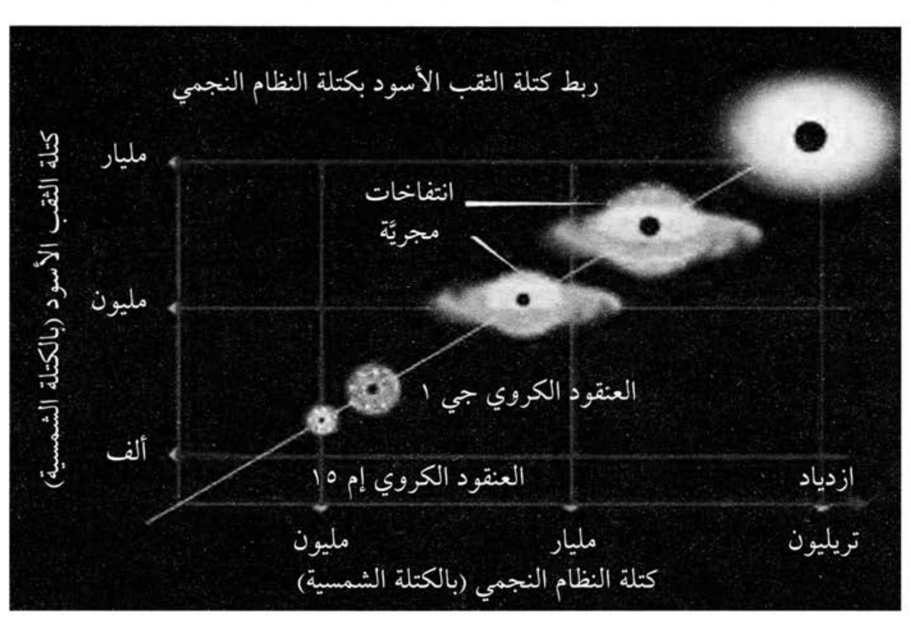
إن علماء الفلك ليسوا متأكدين، لكن هذا الارتباط امتد مؤخرًا ليشمل المجرَّات القزمة وحتى العناقيد النجمية الكروية ذات الثقوب السوداء والكتلة البالغة بضعة آلاف



شكل ٣٩: «إس إس ٤٣٣» هو نظام نجمي ثنائي يتكون من نجم أولي وثقب أسود. وهذا مجرد رسم تخيُّلي؛ لأن هذا النظام على بُعد ١٨ ألف سنة ضوئية، ولا يمكن رؤيته على نحو مفصَّل. يمتلك الغاز الناتج من النجم المصاحب زخمًا زاويًّا كبيرًا؛ لذلك يتدفق نحو الثقب الأسود عبر القرص المزود. توضح إزاحة دوبلر في خطوط طيف الضوء وطيف الأشعة السينية سرعة النفاثتين النسبيتين. ويمثل هذا النوع من الأجرام نسخة مصغرة من الفيزياء الفلكية التي تحدث في مركز الكوازار.

«إم روبن، آر هاينز/المرصد الفلكي الراديوي الوطني»

كتلة شمسية (شكل ٤٠). والمجرَّات الإهليلجية كبيرة وتتكون بالكامل من نجوم قديمة تقريبًا؛ لذا فهي تحتوي على أكبر الثقوب السوداء، أما المجرَّات الحلزونية - على غرار درب التبانة - فتحتوي على عدد أقل من النجوم القديمة، ويتجمع معظمها في انتفاخات مركزية صغيرة؛ لذا فهي تأوي ثقوبًا سوداء متوسطة.



شكل ٤٠: هناك ارتباط وثيق إلى حدٍّ ما بين كتلة النجوم القديمة في المجرَّة وكتلة ثقبها الأسود المركزي، يمتد على مدى أكثر من معامل يبلغ ١٠٠ ألف، من المجرَّات القزمة إلى المجرَّات الإهليلجية العملاقة. وتعمل الانتفاخات العنقودية الكروية داخل درب التبانة على توسيع هذا الارتباط ليشمل بضعة آلاف من الكتل الشمسية. يوضح هذا الارتباط أن الثقب الأسود المركزي يحتوي فقط على أعشار قليلة من جزء من مائة من الكتلة النجمية للمجرَّة. «إيه فيلد/ناسا/وكالة الفضاء الأوروبية»

يمثل رصد الثقوب السوداء الأصغر تحديًا، ويدفع التلسكوبات وأجهزة الرصد إلى استخدام أقصى إمكانياتها. ويعد أفضل أهدافها العناقيد النجمية الكروية، وهي السحب الكروية من النجوم التي تدور حول هالات المجرَّات الكبيرة. وبوجود بضع مئات الآلاف إلى بضعة ملايين من النجوم، فإن الارتباط الموصوف أعلاه يتنبأ بالثقوب السوداء ذات الكتلة البالغة عدة آلاف كتل شمسية. أُعلِنَت حالات الرصد، ولكن لم ينج أيٌّ منها من التدقيق المتشكك. ومع ذلك فقد ملأت مجموعة قليلة من

الأجرام هذه الفجوة، ففي عام ٢٠١٢ على سبيل المثال، شوهد ثقب أسود ذو كتلة تبلغ ٢٠ ألف كتلة شمسية في المجرَّة القزمة «إي إس أوه ٢٤٣-٢٩» (ESO 243-29)، وفي عام ٢٠١٥ رُصد ثقبٌ أسود ذو كتلة تبلغ ٥٠ ألف كتلة شمسية في المجرَّة القزمة «آر جي جي ١١٨» (RGG 118).

لكن أهم اكتشاف لثقب أسود متوسط الكتلة في أواخر عام ٢٠١٥، حدث عندما رصد علماء فلك راديوي يابانيون سحابة غاز دوارة على بُعد ٢٠٠ سنة ضوئية فقط من مركز درب التبانة، وتتبعوا الدوران بخطوط طيف لثمانية عشر جزيئًا مختلفًا واستنتجوا وجود جرم مظلم بكتلة تبلغ ١٠٠ ألف ضعف كتلة الشمس. ويدعم هذا الاكتشاف فكرة أن الثقوب السوداء تنمو بالطريقة نفسها التي تنمو بها الشركات سريعة النمو، من خلال عمليات الدمج والاستحواذ.[٢٥] وبعد ملايين السنين من الآن، عندما يستهلك الثقب الأسود ذو الكتلة البالغة أربعة ملايين كتلة شمسية في مركز مجرَّتنا هذا الجرم المتوسط، سوف ينمو الوحش المركزي بنسبة ٢,٥٪، حتى إننا قد نتخيله يتجشأ في ارتياح. وسيُسجَّل هذا التجشؤ كنبضة من الإشعاعات عالية الطاقة التي تصل إلى الأرض بعد ٢٧ ألف عام.

محاكاة الجاذبية القصوى باستخدام الحاسوب

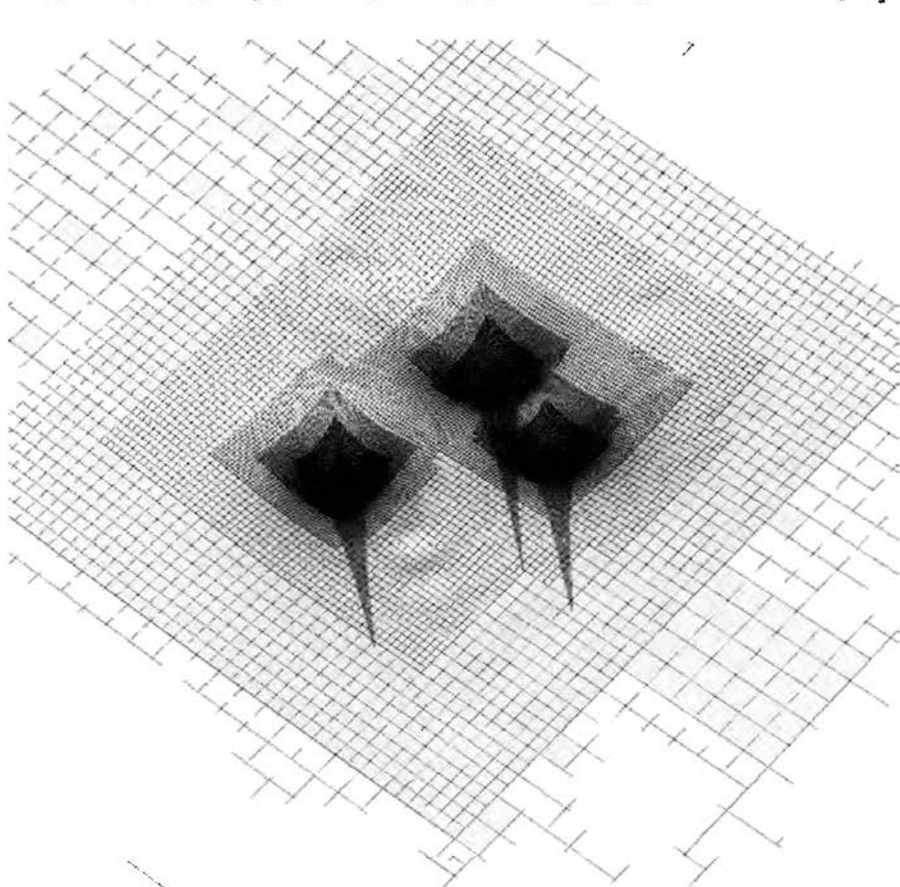
فكَّر أينشتاين في الجاذبية بطريقة جديدة تمامًا، فلم تكن الجاذبية - كما افترض نيوتن - تجرُّ أو تسحب الأشياء في الفضاء، فالشيء الذي يتحرك استجابةً للجاذبية كان يتبع أقصر طريق - وهو ما يسمى جيوديسي - عبر الزمكان المنحني، ورائد الفضاء الذي يسقط ببطء نحو مركبة فضائية يتبع ببساطة انحناء الزمكان. ويدور القمر حول الأرض؛ لأن أقصر طريق خلال الزمكان يُعيده إلى النقطة نفسها في الفضاء. وتحدث نسخة ثنائية الأبعاد من هذا في كل مرة تقوم فيها برحلة طيران طويلة. تخيَّل السفر بالطائرة من لوس أنجلوس إلى مدريد. رغم أن هاتين المدينتين على خط العرض نفسه، فإن الطائرة لا تطير إلى الشرق؛ بل تتجه شمالًا وتطير فوق الطرف الجنوبي لجرينلاند قبل التوجُّه جنوبًا. فهي تتبع أقصر مسافة بين هاتين النقطتين، كما يمكنك التأكد إذا مددت خيطًا على سطح مُجسَّم للكرة الأرضية. لا يحتاج الطيار إلى الالتفاف يسارًا أو يمينًا؛ فالطريق عبارة عن خط مستقيم على سطح ثنائي الأبعاد منحني.

تُكتب أبسط أشكال النسبية العامة في الصورة $G = 8\pi T$، حيث G تمثل انحناء الزمكان عند نقطة ما وT تمثل الكتلة عند تلك النقطة (تقنيًّا، إنها كتلة–طاقة، ولكن نظرًا لأن الطاقة تحتوي على كمية ضئيلة فقط من الكتلة المكافئة وفقًا للمعادلة $E = mc^2$، فبالنسبة لمواقف علم الفلك، تنطبق هذه المعادلة باستخدام الكتلة فقط). تنطبق هذه المعادلة البسيطة على جميع النقاط في الفضاء، كما تلخص كل ما نحتاج إلى معرفته عن الجاذبية.[٢٦]

ومع ذلك، فإن هذه المعادلة الأنيقة هي الشكل الأكثر اختصارًا، كما أنها بلا فائدة في حل أي مشكلة حقيقية. فلتطبيق النسبية العامة على شيء يشبه الثقب الأسود، يجب استخدام المعادلات الكاملة، والتي تتكون من عشر معادلات مختلفة، وتحتوي كل معادلة منها على العديد من الحدود. وينطوي حل هذه المعادلات على عمليات شديدة الصعوبة من الجبر وحساب التفاضل والتكامل. ولفهم ما يحدث عندما يندمج ثقبان أسودان لهما كتلة مختلفة، يجب استخدام كل حدٍّ في كل معادلات أينشتاين، والتي تُكتب في ١٠٠ صفحة من الرياضيات المكثفة، ولا ينجح معها التبسيط.

في تسعينيات القرن العشرين، بعد التقدم السريع في الرياضيات والحوسبة، انطلقت النسبية الرقمية. وتم تطوير تقريبات لمعادلات أينشتاين، وتركزت هذه المقاربات على طرق فصل المكان والزمان، بتبسيط المكان بدقة بحيث يمكن تطبيق الهندسة الإقليدية عليه. وتستخدم العمليات الحسابية «شبكة تكيفية»، حيث تكون شبكة المكان خشنة حيثما تكون الجاذبية ضعيفة ومُسطَّحة، وتكون ناعمة حيثما تكون الجاذبية قوية ومنحنية. وتخضع الشبكة للتعديل على نحو مستمر مع تطور الوضع. وتُقاس سرعة الكمبيوتر بعمليات النقطة العائمة بالثانية، أو ما يُسمى «فلوبس» (FLOPS). كان لجهاز كمبيوتر آي بي إم ٧٠٩٠ – الذي كان أحدث طراز في عام ١٩٦٢ – سرعة تساوي ١٠٠ ألف فلوبس. وفي عام ١٩٩٣ كان أسرع جهاز كمبيوتر، أسرع من سابقه بمليون مرة أيضًا. وفي الوقت الحالي أصبحنا أسرع بمليون مرة كذلك، أو السرعة المذهلة البالغة 10^{18} فلوبس.[٢٧] وحفَّزت مؤسسة العلوم الوطنية هذا البحث من خلال جوائز «التحدي الكبير» لمحاكاة تصادم ثقب أسود ثنائي.[٢٨] وقدَّمت المحاكاة العددية بعض المفاجآت؛ إذ يمكن لمثل هذا الإدماج أن يُنتج كمية هائلة من إشعاع الجاذبية، والتي تساوي ٨٪ من الكتلة الكلية للثقبين الأسودين. وكذلك عندما يندمج ثقبان أسودان، يمكن أن يتلقى الثقب الأسود الناتج «ركلة» بسرعة ٤٠٠ ألف ميل في الساعة كافية لإخراجه من أي مجرَّة.[٢٩]

دعنا نستخدم لوحة قماشية كتشبيه بصري لشيء لا يمكن رؤيته، ألا وهو الزمكان، تُرسم هذه اللوحة القماشية بالجاذبية. حتى الآن، قمنا فقط بمد لوحة قماش الزمكان الفارغ (شكل ٤١). وتمثل النسبية العامة نظرية هندسية للجاذبية؛ لذا إذا وُجدت كتلة في أي مكان، فإن قماش الزمكان يتقوس، ويمكن أن يحتوي على ثقوب وتمزقات



شكل ٤١: النسبية العددية هي مجال حل معادلات أينشتاين للجاذبية بالطرق الحاسوبية، في بيئة فلكية فيزيائية معقدة وواقعية، حيث تكون الحلول الدقيقة للمعادلات مستحيلة. يتمثل أحد الشروط في العمل على نطاقات مختلفة الحجم، وبالنسبة إلى الثقب الأسود الثنائي، يتراوح هذا من المقياس المداري إلى مقياس أفق الحدث. وكما هو موضح هنا، تُسمى إحدى الطرق القوية «شبكة التكيُّف» (adaptive mesh)، حيث يتم تلقائيًّا ضبط عينات الزمكان في العمليات الحسابية وفقًا لقوة الجاذبية المحلية.

«جي آر شومبو/مختبر لورنس بيركلي الوطني»

وثنيات. هذا القماش ثلاثي الأبعاد؛ لذلك فمن المستحيل تخيله، ولكن القماش ليس القصة برمتها، فالثقب الأسود في الكون الحقيقي محاط بالإشعاع والغاز الساخن والجسيمات عالية الطاقة والمجالات المغناطيسية.

إننا نتحدث عن ثلاثة مستويات من الصعوبة، يتضمن المستوى الأول تفاعلات معقدة بين الجسيمات والإشعاع، ويضيف المستوى الثاني المجالات المغناطيسية. ويشمل المستوى الثالث الجاذبية. في هذه المرحلة يستكشف الباحثون تقنية تُسمى المغناطيسية الديناميكية النسبية العامة، وبالطبع فإن الحديث عنها ممل للغاية. وباستخدام تشبيه من مجال الألعاب، فإن هذه المستويات الثلاثة تمثل لعبة الداما مقارنة بلعبة الشطرنج. ففي هذا المجال أنا بارع في لعبة الداما، ويمكنني أن أتدبر أموري في لعبة الشطرنج، ولكنني لا أعرف أي شيء في لعبة جو. تهدف هذه العمليات العددية برمتها إلى تمثيل الفيزياء الفلكية المعقدة للثقب الأسود، وكذلك للقرص المزود والنفاثتين المزدوجتين.[٣٠] وهذه أحدث وسائل محاكاة الثقب الأسود، ولا يمتلك المهارات التقنية للقيام بهذا العمل في العالم سوى أقل من مائة شخص.

تستطيع أجهزة الكمبيوتر محاكاة الثقوب السوداء الصغيرة، ولكن ماذا عن الثقوب السوداء الكبيرة التي تعيش في مراكز المجرَّات؟ لهذا نتحدث عن سيمون ديفيد مانتون وايت، وهو زميل الجمعية الملكية ومدير معهد ماكس بلانك للفيزياء الفلكية في جارشينج. إنه ساحر الجاذبية في أجهزة الكمبيوتر؛ لذلك سنطلق عليه لقب «الساحر»، يمتلك هذا الساحر عينين حزينتين وشاربًا أنيقًا، وكتلة رمادية من الشعر المجعد. كما تتبدى عليه علامات الإرهاق، ولكنك ستبدو مرهقًا للغاية مثله لو أنك صنعت كونًا من الصفر.

كان الساحر يدرس من أجل الحصول على درجة الدكتوراه في كامبريدج مع دونالد ليندن بيل، الرائد والأسطورة في مجال الثقوب السوداء، كما يمتلك أكثر من ٤٠٠ ورقة بحثية مُحكَّمة وأكثر من ١٠٠ ألف استشهاد بأبحاثه؛ وهي أرقام مذهلة تضعه ضمن صفوة المتخصصين في مجاله. كما يعد خبيرًا عالميًّا في خواص المادة المظلمة وتشكيل بنية الكون.[٣١]

إليك طريقة صنع كون في الكمبيوتر، قم بإعداد شبكة ثلاثية الأبعاد للفضاء، أضِف المادة الطبيعية والمادة المظلمة وفق النسب الصحيحة، ثم اجعل الجاذبية تعمل، واجعل الفضاء يتوسع وفقًا لنموذج الانفجار العظيم، وشاهد كتلًا من البنى

كبيرة الحجم تتشكل من التوزيع الأولي السلس للكتلة، وستظهر مجموعة كبيرة من «الجسيمات» كأجرام فلكية. على سبيل المثال، يمكن استخدام مليون جسيم لتمثيل عنقود نجمي بحيث يمثل الجسيم الواحد نجمًا، ولكن لا توجد محاكاة تحتوي جسيمات كافية لتمثيل مجرَّة بحيث يمثل الجسيم الواحد نجمًا، أو حتى الكون كله بحيث يمثل الجسيم الواحد مجرَّة؛ لذلك في هذه الممارسة يمثل الجسيم كمية متفاوتة من الكتلة.[٣٢] كتشبيه، تخيَّل استخدام مليون جسيم لنمذجة البشر، في نموذج للعالم سيمثل كل جسيم ٧٥٠٠ شخص، أو عدد الأشخاص الذين يعيشون في قرية أو في منطقة ريفية صغيرة. فلا يمكن إظهار تفاصيل أدق، لكن النموذج نفسه يمكن أن يمثل التفاصيل الجوهرية لولاية صغيرة في الولايات المتحدة، مثل رود آيلاند أو مدينة متوسطة الحجم مثل أوستن بتكساس، بحيث يمثل الجسيم الواحد شخصًا واحدًا.

تزداد القدرات الحاسوبية اللازمة بسرعة مع زيادة عدد الجسيمات؛ لذلك يستخدم وايت وخبراء البرمجة الآخرون بعض الحيل لتسريع المحاكاة بشكل كبير.[٣٣] فعلى أي حال لا يريد أحد أن ينتظر ١٣٫٨ مليار سنة حتى يصل إلى النتيجة. كانت محاكاة وايت تُعرف باسم «محاكاة الألفية» (MillenniumRun) لأنها كانت أول نموذج مُبسَّط قوي لجزء كبير من الكون بعد عام ٢٠٠٠.

تشمل هذه المحاكاة الجاذبية فقط، لكن المجرَّات تحتوي على الغاز وكذلك النجوم، ويتصرف الغاز بشكل مختلف عن النجوم، عندما تصطدم مجرتان حلزونيتان فإن النجوم وجزيئات المادة المظلمة لا تصطدم أبدًا تقريبًا؛ لذلك تمر مكونات هذه المجرَّات عبر بعضها بعضًا، لكن سحب الغاز تصطدم إحداها بالأخرى، وترتفع حرارتها، وتتوهج بسطوع، وتشكل النجوم. يتصرف الغاز بشكل يشبه السائل أكثر من كونه مجموعة من الجسيمات. وللتعامل مع الغاز، تحاكي أجهزة المحاكاة سلوك الغاز مع الجسيمات السلسة التي لها توزيع احتمالي بدلًا من موقع واحد.[٣٤] كما أنها تطبِّق الفيزياء، وذلك عبر المعادلات لتشمل تفاصيل مهمة رغم صغر حجمها، مثل انفجارات المستعرات العظمى وتشكل الثقوب السوداء، لنستمع إلى سيمون وايت بينما يتحدث عن هذه المحاكاة الكونية المميزة:

«إن ما كان جديدًا في الألفية الأصلية كان أولًا الحجم الكلي، والذي كان أكبر بعشرة أضعاف تقريبًا من الحسابات السابقة. وكذلك حقيقة أننا قمنا بتطبيق التقنيات التي سمحت لنا بمتابعة التكوين الفعلي للمجرَّات المرئية بطريقة تقريبية، ولكن تتبع

القوانين الفيزيائية. لم نكن نستطيع ذلك بتوزيع عنصر المادة المظلمة غير المرئية في الكون وحسب، ولكن أيضًا استطعنا التنبؤ بالأماكن التي ينبغي أن توجد فيها تلك الأشياء التي نراها فعليًا وما ينبغي أن تكون عليه خواصها ... كانت هناك بالفعل مفاجآت، تمثل إحداها إدراك أنه لفهم خصائص المجرَّات المرئية، يجب أن نفهم آثار الثقوب السوداء في مراكزها. تشكلت المجموعة الفعلية للمجرَّات من خلال تطوير الثقوب السوداء في مراكزها، فليس صحيحًا أن هذا الجرم الصغير الموجود في المركز منفصل عن بقية المجرَّة، رغم أن الثقوب السوداء تحتوي فقط على عُشر بالمائة من الكتلة النجمية للمجرَّة، وهو جزء صغير جدًّا».[٣٥]

وفي عام ٢٠٠٥ انتهت «المحاكاة الألفية».[٣٦] واستخدمت ١٠ مليارات جسيم لمحاكاة مكعب من الكون طول ضلعه يساوي ملياري سنة ضوئية. (تطلب تخزين النتائج ٢٥ تيرابايت من المساحة التخزينية). وليس هذا كامل الكون، لكنه كبير بما يكفي ليكون «عينة مناسبة» تضم أكبر بِنَى تستطيع الجاذبية تشكيلها خلال ١٤ مليار سنة، ونُشرت مئات من الأوراق البحثية العلمية على أساس هذه المحاكاة. أما أحدث محاكاة في الوقت الراهن فهي «محاكاة إليوسترس».[٣٧] فوفقًا لقانون مور تكمن قوة الحوسبة المكتسبة التي تنتج عن أصغر الترانزستورات في تضاعف حجم أفضل محاكاة كل عشرين شهرًا. وبحلول نهاية عام ٢٠١٧ كانت أجهزة المحاكاة قد كسرت حاجز التريليون جسيم. ومن خلال هذه المحاكاة ولأول مرة، تتسنى نمذجة جزء كبير من الكون بشكل واقعي، وصولًا إلى مستوى من التفاصيل يمكن أن يمثل بنية مجرَّة فردية. ويمكن للكمبيوتر الآن تتبع ظهور ونمو ملايين الثقوب السوداء فائقة الضخامة على مدار ١٣ مليار سنة.

وكما تم مع العديد من مُنظِّري علم الفلك، كان التدريب الأولِي لسيمون وايت في مجال الرياضيات، يتذكر هو وقت أن كان يدرس خياراته للدراسات العليا، فيقول: «كان لديَّ خياران في كامبريدج. أحدهما هو دراسة ميكانيكا الموائع النظرية، والديناميكا الهوائية وما هو على شاكلتهما. كان الطلاب يجلسون هناك في مبنى في وسط كامبريدج، في مكاتب الطابق السفلي ليس بها نوافذ. وكان الخيار الآخر الفيزياء الفلكية. لكن كان مركز الفيزياء الفلكية خارج المدينة، وكان مبنى به الكثير من النوافذ، وفي الطريق إلى ذلك المبنى كانت الكثير من الأشجار والأبقار. رأيت حينها الفيزياء الفلكية أفضل قليلًا».[٣٨]

كيف تنمو الثقوب السوداء والمجرَّات؟

إن حيوات الثقوب السوداء والمجرَّات متداخلة، فالثقب الأسود فائق الضخامة يشغل جزءًا صغيرًا من حجم المجرَّة، كما يمتلك جزءًا صغيرًا جدًّا من كتلة المجرَّة. ومع ذلك، فقد رأينا أن كل مجرَّة تحتوي على ثقب أسود، وكتلة الثقب الأسود مقترنة بشدة بكتلة النجوم في المجرَّة بأكملها. ماذا يعني ذلك بشأن كيفية نمو الثقوب والمجرَّات السوداء معًا عبر الزمن الكوني؟

لقد ولَّى العصر الذهبي للكوازارات، يمكننا رصد الثقوب السوداء فائقة الضخامة القابعة في المجرَّات القريبة، لكنها تكون في الغالب هادئة، مثل الثقب الأسود الموجود في مجرَّتنا، فواحد من كل ١٠٠ ثقب أسود يكون نشطًا على نحو معتدل، وواحد من بين كل مليون ثقب أسود يكون كوازارًا. يمكن لعمليات المسح باستخدام الطول الموجي البصري وللأشعة السينية تتبع سطوع الكوازارات على مدى الزمن الماضي. حدثت ذروة الكوازارات عند الانزياح نحو الأحمر البالغ من $z = 2$ إلى $z = 3$، منذ نحو ١١ مليار سنة، أو منذ ٢ إلى ٣ مليارات سنة بعد الانفجار العظيم. وقد كانت أكثر نشاطًا ممَّا هي عليه الآن بآلاف المرات. كانت سماء الليل القديمة مختلفة تمامًا عن سماء الليل في وقتنا الحالي؛ فقد كان الكون أصغر بأربع مرات وكانت المجرَّات تندمج وتُشكِّل النجوم بسرعة، وكانت مئات المجرَّات مرئية بالعين المجردة، على عكس المجرَّات الثلاث التي يمكن أن نراها الآن،[٣٩] وكان أقرب كوازار إلينا ليكون أقرب بمائة مرة من الوضع الحالي، وسيكون مرئيًّا أيضًا بالعين المجردة. تحكي بيانات عمليات الرصد قصة زيادة سريعة في نشاط الكوازارات متبوعة بانخفاض بطيء.

تحتوي جميع المجرَّات الكبيرة على ثقوب سوداء فائقة الضخامة، ولكن ذلك لا يستلزم أن تُظهِرَ جميعها نشاطًا شبيهًا بالكوازار. كيف نعرف أن نشاط الكوازار عرضيٌّ وليس سمة مميزة لمجموعة معينة من المجرَّات؟ من الصعب الإجابة على هذا السؤال؛ لأن الفلكيين لا يستطيعون التحديق في مجرَّات معينة لمعرفة كيفية تطورها؛ بل يُجرون عمليات مسح تلتقط عددًا كبيرًا من المجرَّات في جميع الفترات، ويستخدمون تلك البيانات لأخذ لقطة للنشاط في فترة معينة.

كان هذا هو مجال بحثي على مدار العقد الماضي، كان الهدف هو فهم كيفية نمو الثقوب السوداء والمجرَّات وتداخلهما معًا، إنني أستمتع بالأبحاث الفلكية؛ لأنها

تسلك مسار الفيزياء ذاته، مع وجود تعاون أقوى بآلاف المرات، وأدوات استغرق تطويرها عِقدًا من الزمان. فلا يزال بالإمكان الذهاب إلى التلسكوب لبضع ليالٍ مع طالب دراسات عليا وفكرة جيدة وإحداث تأثير.

هكذا جئت أنا وجوناثان ترامب إلى سفوح جبال الأنديز، وراقبنا السماء تزداد ظلمة فوق سلسلة الجبال وأعددنا قائمة بعمليات الرصد. كنا نهدف إلى الوصول إلى النطاق الرائع لنمو الثقب الأسود، وهو الفترة الزمنية التي تتراوح بين ٣ و١٠ مليارات سنة بعد الانفجار العظيم، عندما كانت معظم عمليات اندماج المجرَّات تحدث، وكذلك عمليات تغذية الثقوب السوداء. وتحديدًا، كنا نحاول تحديد الحد الأدنى للنشاط النووي. ما أقل مدى يمكن أن يكون عليه معدل التراكم بالنسبة إلى الثقب الأسود لكي يضيء ككوازار؟ تمكنَّا من العثور على ثقوب سوداء على بُعد ١٠ مليارات سنة ضوئية كانت هادئة مثل الثقب الأسود في مركز مجرَّتنا، وكانت بين أيدينا تكنولوجيا تخلصت من لوحات التصوير الفوتوغرافي التي كنت أستخدمها في أستراليا قبل ثلاثين عامًا. حينها لم يقتصر إنجازنا على اكتشاف ٣٠٠ كوازار في ليلة جيدة، ولكننا استطعنا أيضًا قياس كُتَل ثقوبها السوداء.

كان جون المتدرب النشط بينما كنت أنا المخضرم المبتسم، ولكننا في الواقع كنا نتبادل الأدوار في كثير من الأحيان. لم يُصِبْ طول الوقت حماسي حيال البحث بالفتور، حتى إنني كنت أحيانًا أرتكب أخطاءً فادحة بسبب تسرعي في جمع البيانات، بينما كان جون يحدُّ من فيض حماسي ويحتويه. اصطدمنا برقعة من الغيوم في منتصف إحدى الليالي؛ لذا حاولت التحلي بالصبر. لقد سافرت الفوتونات لمليارات السنين لكي نلتقطها بعدستنا الكبيرة فما الفارق الذي ستُحدثه ساعات قليلة إضافية؟ مشيت إلى الخارج وشاهدت السماء صافية، وإلى الغرب كانت قمم السحب تغطي مدى الرؤية حتى المحيط الهادي. وإلى الشرق، زُين حقل النجوم بصورة ظِلِّيَّة لجبال الأنديز. وكان هناك نسر أمريكي يطير في دائرة فوق رأسي في صمت.

كانت الليلة الأخيرة في التلسكوب مشوبة بالإرهاق والحزن، تعاملنا مع ومضة خضراء عند غروب الشمس، إذا نجح علماء الفلك في الحصول على فرصة العمل لبضع ليالٍ في تلسكوب كبير خلال عام عُدُّوا من المحظوظين. فإذا كانت السماء غائمة يتعين عليهم العودة مرة أخرى في العام التالي. بعد هذه الجولة من استخدام التلسكوب كنا سنفترق.

شعرنا بحيرة حيال مجموعات البيانات المبعثرة لدينا، كانت بعض أنظمة الكوازارات تتضمن ثقوبًا سوداء ضخمة ولكن كانت انبعاثاتها ضعيفة، وكانت أنظمة أخرى تتضمن ثقوبًا سوداء صغيرة لكنها شديدة السطوع. كانت آلية التغذية لغزًا. لقد اصطدنا ٥٠٠ ثقب أسود في أسبوع، لكن ذلك بدا وكأنه قطرة ماء في كون به ١٠٠ مليار مجرَّة، يحتوي كلٌّ منها على ثقب أسود، بدت الثقوب السوداء وكأنها تسخر منَّا بصمت، بينما تُخفي عنَّا أسرارها.

لقد رأينا في وقت سابق أن الحفاظ على مستوى سطوع كالكوازار يتطلَّب معدل تراكم يبلغ بضع كُتَل شمسية لكل عام، ويوجد نوعان من الآثار المترتبة على معدل التغذية البسيط هذا؛ أولًا: لا توجد كميات كبيرة من الغاز في المناطق المركزية لمعظم المجرَّات، ونادرًا ما تبتلع الثقوب السوداء نجومًا كاملة، ومن ثَمَّ يُستنفَد الوقود في أقل من ١٠٠ مليون عام. يتساقط الغاز ببطء على المجرَّات من الفضاء بين المجرَّات، ويُضاف الغاز عندما تندمج المجرَّات، لكن كلا العمليتين لا تحدثان كثيرًا الآن بعد أن أصبح الكون كبيرًا والمجرَّات بينها مسافات شاسعة. ونظرًا لاستنفاد «وقود» الثقب الأسود بسرعة أكبر بكثير من الوقت الذي يستغرقه ظهور وانحسار مجموعة الكوازارات المرصودة، يجب أن تكون الكوازارات الفردية «قيد التشغيل» لجزء قليل من الوقت و«خارج الخدمة» لجزء كبير من الوقت.

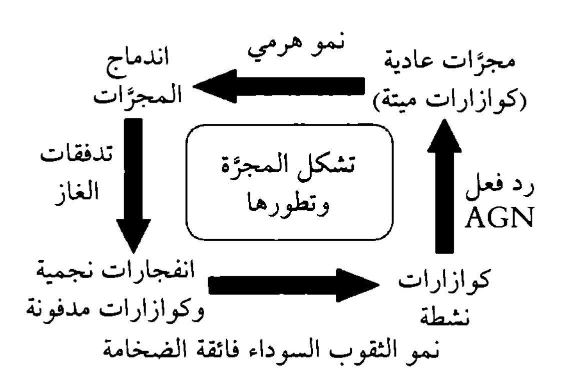
ثانيًا: يعني معدل النمو البطيء للثقوب السوداء أنها يجب ألَّا تصبح كبيرة للغاية بسرعة كبيرة، ولكن ذلك لا يحدث. كان «مسح سلون الرقمي للسماء» يبحث عن كوازارات في غضون بضعة مليارات من السنين الأولى بعد الانفجار العظيم. ويعد أقدم كوازار وجده حتى الآن هو كوازار مضيء ذو انزياح نحو الأحمر يبلغ $z = 7.5$. وهذا يشير إلى أن الثقوب السوداء فائقة الضخامة والتي تبلغ كتلتها عدة مليارات كتلة شمسية تشكلت ونمت خلال المليار سنة الأولى بعد الانفجار العظيم.[٤] يبدو أن هذا يتعارض مع التقدم البطيء والمنهجي من المجرَّات الصغيرة إلى المجرَّات الكبيرة من خلال عمليات الاندماج. كما أنه يتعارض مع أقصى معدل لنمو الثقب الأسود الذي حدده آرثر إدنجتون منذ قرن. ليس من الممكن أن تبدأ بكتلة «بذرية» تبلغ ١٠ كتل شمسية، والتي تتوافق نموذجيًّا مع الثقب الأسود الذي يخلفه موت نجم ضخم، وتصل إلى مليار كتلة شمسية في مليار سنة. فلتكوين هذه الكوازارات القديمة المضيئة، يجب أن تبلغ الكتلة البذرية ١٠٠٠٠ كتلة شمسية.

قدمت عمليات المحاكاة الحديثة تفسيرًا؛ في الموجة الأولى لتكوين المجرَّات بعد بضع مئات من ملايين السنين من الانفجار العظيم، تسبب إشعاع الخلفية في البداية في منع النجوم من التكوُّن، وعندما تشكلت كان تشكلها عملية سريعة وعنيفة خلَّفت وراءها العديد من الثقوب السوداء الصغيرة، وفي البيئة عالية الكثافة اندمجت تلك الثقوب السوداء الصغيرة لتشكل بذور ثقوب سوداء بكتلة تبلغ ما بين الـ $١٠^{٤}$ والـ $١٠^{٦}$ كتل شمسية.[٤١] تساعد هذه القفزة في البداية على نمو الثقوب السوداء إلى المستوى فائق الضخامة (مليار كتلة شمسية أو أكثر) خلال نصف مليار سنة أخرى.

يساعد مفهوم رد الفعل في ربط هذه البيانات الرصدية معًا، يرتبط الثقب الأسود بعلاقة تكافلية مع المجرَّة المضيفة، فلا يمكن أن ينمو أو يضيء مثل الكوازار دون إمدادات من الغاز من المناطق المركزية في المجرَّة. ولكن عندما يكون نشطًا فإنه يُخرج الكثير من الطاقة إلى حد إبعاد الغاز من المناطق المركزية ومنع تكوين النجوم. ففي المرحلة النشطة الممتدة لعشرة ملايين سنة، يبعث الكوازار $١٠^{٥٢}$ جول من الطاقة. وهذا يساوي تقريبًا طاقة الجاذبية التي تربط النجوم في مداراتها في المجرَّة الكبيرة؛ لذا من الواضح أن الكوازار يمتلك القدرة على تمزيق المجرَّة. ويعني رد الفعل أن الكوازارات عندما تطرد الغاز وتُخمد نشاطها، يتعين حينها على الغاز أن يتراكم مرة أخرى لبدء مرحلة نشطة جديدة، يربط رد الفعل تطور المنطقة الداخلية للمجرَّة وثقبها الأسود المركزي معًا، وبهذا يفسر العلاقة التي يراها علماء الفلك بين كتلة الثقب الأسود وكتلة النجوم الموزعة على نطاقات أكبر بكثير.[٤٢]

لجمع كل ذلك معًا دخلت المجرَّات والثقوب السوداء مرحلة بناء مكثفة خلال أول مليار سنة بعد الانفجار العظيم. نمت المجرَّات - محكومة بالمادة المظلمة - هرميًّا، بحيث تشكلت الأجرام الصغيرة أولًا واندمجت بمرور الوقت لتكوين أجرام كبيرة. وصل تشكيل النجوم ومعدل الاندماج إلى الذروة، ثم تراجعا ببطء مع تراجع إمدادات الغاز وزيادة حجم الكون. اتخذ مشروع تشكيل الثقب الأسود مسارًا مختلفًا. شكلت الأماكن ذات الجهد التثاقلي الأكبر أكبر المجرَّات وأكبر الثقوب السوداء بسرعة، وأصبحت موجودة الآن من حولنا كمجرَّات إهليلجية، متعطشة منذ زمن طويل للغاز، مع وجود كوازارات ميتة في مراكزها. وفي الوقت نفسه، شكلت الأماكن ذات الجهد التثاقلي الأصغر مجرَّات متوسطة الحجم مثل مجرَّة درب التبانة، التي شكلت ثقوبًا سوداء أصغر استمرت في النمو وظلت نشطة لمدة أطول.[٤٣] انتهت الفترة الذهبية

لتشكيل المجرَّات والثقوب السوداء (شكل ٤٢). في الشفق المستقبلي للكون، بينما تحتضر النجوم الأخيرة ويحل محلها عدد قليل من النجوم الجديدة؛ لذلك فإن الإثارة الوحيدة ستأتي من تلك المناسبات النادرة عندما تصطدم مجرتان ناضجتان ويندمج ثقباهما الأسودان الضخمان.



شكل ٤٢: يوجد تفاعل معقد بين الثقوب السوداء والمجرَّات المضيفة لها. تنمو المجرَّات هرميًّا، فتنتقل من الحجم الصغير إلى الحجم الكبير من خلال عمليات الاندماج، وتنمو الثقوب السوداء المركزية أيضًا، من خلال مزيج من عمليات الاندماج وسقوط الغاز عليها. يمكن لنشاط الكوازار أن يدفع تدفقًا من الغاز للخارج، والذي يتسبب في إخماد هذا النشاط، وهي ظاهرة تسمى رد الفعل. أخيرًا، عندما يُستنفد الغاز أو يكون رد الفعل قويًا جدًّا، يجوع الثقب الأسود وتستضيف المجرَّة كوازارًا ميتًا.

«بي إف هوبكنز/معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا»

الكون كثقب أسود

هل الكون ثقب أسود؟ هناك بعض أوجه التشابه الظاهرية؛ كتلة ونصف قطر الكون المرصود توافق العلاقة نفسها التي تحددها كتلة ونصف قطر شفارتسشيلد للثقب الأسود. والكون له أفق حدث، وهو الحد الفاصل بين المجرَّات التي يمكننا رؤيتها، والمجرَّات التي لا نستطيع رؤيتها لأن ضوءَها لم يُتح له الوقت للوصول إلينا خلال عمر الكون.

لكن توجد أيضًا اختلافات حقيقية؛ فعلى مستوى عادي يوجد للثقب الأسود داخل - الفضاء المقفل والزمن داخل أفق الحدث – وخارج. أما الكون فيُعرَّف على

أنه كل الفضاء والزمن؛ لذلك لا يوجد لديه «خارج». وكذلك أيضًا يمثل أفق حدث الثقب الأسود حاجزًا ذا اتجاه واحد، فبينما لا يمكن للمعلومات أن تهرب، يمكننا اختيار المرور عبر الحدث الأفق ومعرفة ما يوجد في الداخل. في عالمنا المتسارع، يفصل أفق الحدث، الذي يقع على مسافة ١٦ مليار سنة ضوئية، عنَّا أحداثًا لن نراها أبدًا، مهما طال انتظارنا. ربما نرى أحداثًا في مجرَّات حدثت قبل عبور أفق الحدث، ولكن الأحداث اللاحقة تتجاوز رؤيتنا إلى الأبد.[٤٤] عبَّر نيد رايت - أستاذ علم الفلك في جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس — عن ذلك بإيجاز في أسئلته الشائعة حول علم الكونيات: «الانفجار العظيم لا يشبه في الحقيقة الثقب الأسود. فالانفجار العظيم عبارة عن متفردة تمتد عبر كل الفضاء في لحظة واحدة، في حين أن الثقب الأسود متفردة تمتد على طول الزمن في لحظة واحدة».[٤٥] ثمة طريقة أخرى لقول هذا، وهي أن كوننا كان يحتوي على متفردة في الماضي نشأ منها كل شيء، في حين أن الثقب الأسود يحتوي على متفردة قد تختفي فيها الأشياء في المستقبل.

كما استُخدِمَت الثقوب السوداء لشرح وجود الكون. هذا هو علم الكونيات الظني؛ لذا فلتتأهب لما يأتي. تعتمد نظرية الانفجار العظيم على حدث تضخم، وهو فترة التوسع الآسي بعد $١٠^{-٣٥}$ ثوانٍ بعد الانفجار العظيم، والتي انتفخ فيها الكون من حجم أصغر من البروتون إلى قطر متر تقريبًا، توجد بعض عمليات الرصد الداعمة للتضخم، ولكن لا توجد حتى الآن نظرية جيدة بشأن سبب ذلك.

حاولت ورقة بحثية مثيرة للاهتمام نُشرت عام ٢٠١٠ إزالة الحاجة إلى التضخم من خلال توسيع نظرية الجاذبية إلى نوع جديد من الجسيمات الأساسية. استخدمت النظرية قوة تنافرية تسمى «الالتواء». لا يُلاحظ الالتواء عند الكثافات ودرجات الحرارة الطبيعية، لكن في الظروف التي حدثت في وقت الانفجار العظيم، كان سيُسمح للكون بأن يتشكل من داخل ثقب أسود. ومن ثمَّ سيكون كوننا زمكانًا ناتجًا عن ثقب أسود.[٤٦] ولهذه الفكرة فائدة جانبية تتمثل في شرح سهم الزمن، يتدفق الزمن إلى الأمام بالنسبة لنا بسبب التدفق غير المتماثل للمادة في أفق الحدث من الكون الأصل. أي أنه على الجانب الآخر من أفق الحدث، في الكون الأصل، يتدفق الزمن في الاتجاه المعاكس. ينشأ هذا الموقف الجامح لأن الأحداث التي حدثت منذ الانفجار العظيم تسير في الاتجاه المعاكس في الكون الأصل.

لكن نظريةً أكثر جموحًا نُشرت في عام ٢٠١٤ توصلت إلى مجموعة أدوات نظرية الأوتار، في محاولة لتجنب متفردة الانفجار العظيم، اقترح باحثون في معهد بريمتر للفيزياء النظرية في واترلو بكندا، نظرية مفادها أن عالمنا نشأ نتيجة لتكوُّن ثقب أسود في عالم ذي أبعاد أعلى. وفي كوننا ثلاثي الأبعاد، يكون للثقوب السوداء آفاق أحداث ثنائية الأبعاد، أما في الكون رباعي الأبعاد، سيكون للثقب الأسود أفق حدث ثلاثي الأبعاد. يقترح نيايش أفشوردي وزملاؤه أن عالمنا جاء إلى حيز الوجود عندما انضغط نجم في عالم ثلاثي الأبعاد متحولًا إلى ثقب أسود. والانفجار العظيم ما هو إلا سراب، يتبع لحدث ذي أبعاد أعلى. ولوصف هذه المسألة أشاروا إلى قصة أفلاطون بشأن الكهف والتي تحكي أن: «مجموعة من السجناء لم يروا إلا ظلالًا ثنائية الأبعاد في سجنهم، فهي واقعهم الوحيد. إذ منعتهم قيودهم من رؤية العالم الحقيقي، الذي هو عالم ذو بُعد إضافي للعالم الذي يعرفونه ... لم يفهم سجناء أفلاطون القوى الكامنة وراء الشمس تمامًا كما لا نفهم العالم الأكبر رباعي الأبعاد».[٤٧]

تصنيع الثقوب السوداء في المختبر

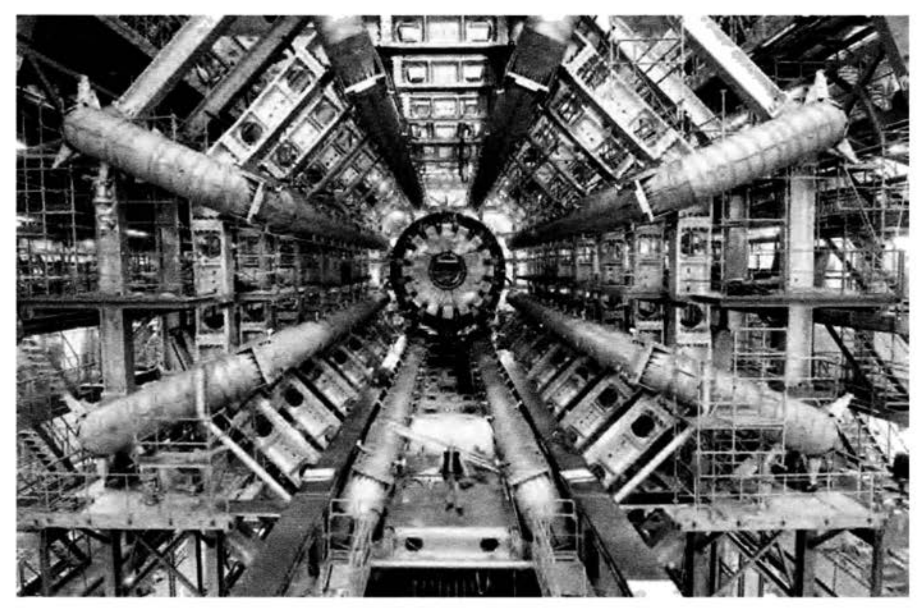
دعنا نجلب الثقوب السوداء إلى الأرض بطرح هذا السؤال: هل لدينا القدرة على صنع ثقب أسود؟ قبل الإجابة على السؤال، دعنا نتذكر مدى استثنائية الثقب الأسود. فنصف قطر شفارتسشيلد يتناسب مع الكتلة، فلتحويل الشمس إلى ثقب أسود، يجب ضغطها إلى كرة نصف قطرها ٣ كيلومترات، وهو ما يكافئ كثافة قدرها ٢٠ تريليون كيلوجرام لكل متر مكعب. وتحويل الأرض إلى ثقب أسود يعني ضغطها إلى كرة نصف قطرها ٩ ملليمترات، أي أصغر قليلًا من الكرة المستخدمة في لعبة كرة الطاولة، وهو ما يكافئ كثافة مذهلة تبلغ $١٠^{٢٤}$ كيلوجرامات لكل متر مكعب. وللمساعدة على تخيُّل ذلك، فإن كثافة الصخرة العادية تساوي ٢٠٠٠ كيلوجرام لكل متر مكعب. وبفضل قوته الرائعة، يستطيع سوبرمان ضغط قطعة كبيرة من الفحم وتحويلها إلى ماس، لكن ذلك سيزيد الكثافة من ٩٠٠ إلى ٣٥٠٠ كيلوجرام لكل متر مكعب، وللوصول إلى كثافة الثقب الأسود، يتعين عليك ضغط المادة بعامل آخر قدره ١٠٠٠ مليار مليار! حاول فعل ذلك يا سوبرمان.

إن صنع الثقب الأسود يتجاوز كثيرًا قدراتنا الحالية. فمصادم الهادرونات

الكبير يخلق طاقات غير مسبوقة، لكنها ضعيفة بمعامل ١٠ ملايين مرة بالنسبة لصنع ثقوب سوداء، حتى من الناحية النظرية (شكل ٤٣).[٤٨] لم يمنع ذلك المنافذ الإخبارية من تسميته «آلة يوم القيامة» وتخمين أنه ربما يصنع ثقوبًا سوداء مجهرية يمكن أن تغرق حتى مركز الأرض وتستهلك الكوكب. لقد أخفق البحث عن الثقوب السوداء المجهرية،[٤٩] وفُضح زيف سيناريوهات يوم القيامة المختلفة بشكل منطقي.[٥٠]

لو وُجدت أبعاد إضافية، فربما تدفقت الجاذبية في كوننا إلى أبعاد أخرى. وهذا من شأنه أن يفسر السبب في كون الجاذبية قوة ضعيفة. وكذلك أيضًا، نظرًا لأن الطاقة اللازمة لصنع ثقب أسود مجهري تعتمد على عدد أبعاد المكان، فسيكون من السهل صناعة ثقوب سوداء مجهرية. وإذا نظرنا إلى ذلك على هذا النحو، فإن حقيقة أن مُعجِّلات الجسيمات لا يمكن أن تصنع ثقوبًا سوداء مُصغَّرة تمثل دحضًا لفكرة الأبعاد الإضافية. كذلك، فإن الطاقات الكافية لصنع ثقوب سوداء مجهرية - والتي تتجاوز كثيرًا قدرات مصادم الهادرونات الكبير - تُرى في الأشعة الكونية الفضائية كل بضعة أشهر. ومع ذلك، لا يوجد دليل على أن الأشعة الكونية تصنع ثقوبًا سوداء. وفي النهاية، حتى لو كان المصادم قادرًا على صنع ثقوب سوداء، فستكون ضئيلة للغاية بمقدار $١٠^{-٢٣}$ كيلوجرامات، بحيث ستحتاج إلى ٣ تريليونات سنة لاستهلاك ما يكفي من المادة لتنمو وتصير كتلة تساوي كيلوجرامًا واحدًا، ولكن إذا كانت نظرية الثقوب السوداء صحيحة، فلن تحصل أبدًا على فرصة للنمو؛ لأنها ستتلاشى إلى لا شيء بسبب إشعاع هوكينج في غضون جزء صغير من الثانية.[٥١]

إذا كان «بالإمكان» صنع ثقوب سوداء مُصغَّرة، فإنها ستوفر وسيلة مقنعة للسفر إلى النجوم. فالسفر بين النجوم عالق عند خط البداية لأننا نستخدم الطاقة الكيميائية لتشغيل صواريخنا. وهذا الوقود غير الكفء يكفي لنقل الناس في مدار حول الأرض ونقل الحمولات في جميع أنحاء النظام الشمسي، ولكن لا أمل فيه من أجل السفر مليارات الأميال إلى أقرب النجوم. ومع ذلك فإن الطاقة المنبعثة من إشعاع هوكينج الناتج عن ثقب أسود مجهري يمكن أن تدفع المركبة الفضائية إلى سرعة قريبة من سرعة الضوء. يجب أن يكون الثقب الأسود المستخدم في السفر في الفضاء صغيرًا بدرجة تكفي لصنعه وأن تكون له كتلة تساوي كتلة المركبة الفضائية، وأن يعيش طويلًا بما يكفي ليكون مفيدًا. والثقب الأسود الذي يزن نصف مليون طن سيكون مناسبًا لذلك، فسيكون حجمه $١٠^{-١٨}$ أمتار، وسيُنتج طاقة تبلغ $١٠^{١٧}$ واط، وسيكون عمره



شكل ٤٣: المكشاف أطلس في مصادم الهادرونات الكبير (LHC) في سويسرا. ثمَّة ثمانية مغناطيسات حلقية تحيط بالمكشاف حيث تصطدم البروتونات بطاقات مذهلة وسرعة قريبة من سرعة الضوء. على الرغم من أن المادة تنضغط على الفور في مصادم الهادرونات الكبير، فإن الكثافات أقل بكثير ممَّا هو مطلوب لصنع ثقب أسود، وحتى لو توافرت الكثافة بطريقة ما، فإن الثقب الأسود الناتج سيكون صغيرًا جدًّا لدرجة أنه سيتبخر في غضون جزء صغير جدًّا من الثانية عن طريق إشعاع هوكينج.

«إم برايس/تجربة أطلس، ٢٠١٨، سيرن»

ثلاث أو أربع سنوات، وبافتراض تحويل ١٠٪ إلى طاقة حركية، فإنه سيدفع المركبة الفضائية إلى سرعة تبلغ ١٠٪ من سرعة الضوء في ٢٠٠ يوم.[٥٢] سيقع الثقب الأسود في بؤرة عاكس مكافئ من أجل صنع قوة دفع إلى الأمام، وهذا هو المفهوم، يتبقى فقط الهندسة.

الفصل السادس

الثقوب السوداء كاختبارات للجاذبية

إن قانون نيوتن للجاذبية ليس سوى تقريب للمستوى الأعمق للواقع الذي تصفه نظرية النسبية العامة لأينشتاين، عندما تكون قوة الجاذبية قوية يظهر السلوك الغريب للزمكان المنحني؛ ينحني الضوء، وتتحرك الساعات ببط ويخوننا الحدس. بعد قرن من نشرها لأول مرة، اجتازت نظرية أينشتاين جميع الاختبارات بامتياز، ولكن كانت جميع الاختبارات تقريبًا تتعامل مع الجاذبية الضعيفة.

يمثل الثقب الأسود ميدان الاختبار النهائي للنسبية العامة، ففي الثقب الأسود تتسم تشوُّهات المكان والزمان بالتطرُّف، وعند أفق الحدث يُتوَقع من الزمن أن يتجمد. وفي فلك الفوتونات (photon sphere)، الذي يبعد عن أفق الحدث مسافة تساوي ٥٠٪ من مسافة بُعد أفق الحدث عن المتفردة، يُتوقع أن تدور الفوتونات مثل الأقمار الصناعية التي تدور حول الأرض. لا يمكن إنشاء جاذبية بهذه القوة في أي مختبر على الأرض. إذا توافرت الظروف المثالية يمكننا إجراء اختبارات على ثقب أسود قريب إلى حدٍّ ما من الأرض. لكن أقرب الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية تقع على بُعد مئات السنين الضوئية، وأقرب الثقوب السوداء فائقة الضخامة موجودة على بُعد ملايين السنين الضوئية؛ لذلك يجب على علماء الفلك استخدام الثقوب السوداء البعيدة لتصميم تجارب لاختبار الجاذبية بطرق جديدة.

الجاذبية من نيوتن إلى أينشتاين وما بعدهما

لا يمكن فهم الثقوب السوداء إلا من خلال نظرية أينشتاين للجاذبية، ولكنها ليست السبب وراء الحاجة إلى نظرية جديدة للجاذبية. تبدأ هذه القصة في إنجلترا في عام ١٦٦٥. في سن الثالثة والعشرين كان إسحاق نيوتن قد فشل بالفعل كمزارع؛ لذلك أرسلته والدته إلى كامبريدج للدراسة. أُغلقت الجامعة بسبب الطاعون، واضطُر نيوتن

إلى البقاء في المنزل، حيث كان يفكر في الجاذبية. عندما كان يُدوِّر صخرة مربوطة في نهاية خيط، كان يستطيع أن يرى أن الصخرة تريد أن تطير للخارج، لكن الخيط كان يمثل قوة مضادة. فما القوة المضادة التي أبقت القمر يدور حول الأرض والكواكب تدور حول الشمس؟ وبحلول عام ١٦٨٧، استنتج الإجابة التي مفادها أن القوة تتناقص مع معكوس مربع المسافة. قام نيوتن بتفصيل نظرية الجاذبية في كتابه الرائع «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية».

وسرعان ما شرع علماء الفلك في استخدام هذا القانون بشكل متزايد لإجراء تنبؤات دقيقة، تم التنبؤ بعودة المذنب الذي يحمل اسم إدموند هالي في أبريل ١٧٥٩، وعندما حدث ذلك ذاع صيت نيوتن. وبعد قرن من الزمان كان عالم الفلك الفرنسي أوربين جان جوزيف لوفيرييه يتابع حالة شاذة في مدار أورانوس، أول كوكب جديد يتم اكتشافه منذ العصور القديمة. فقد استنتج أنه كان يضطرب في مداره بسبب جرم خارجي، وتوقع كتلة وموقع هذا الجرم المتداخل. ثم اكتُشف نبتون بعدها مباشرة في مرصد برلين. وبدا أنه لا حدود للقوة التفسيرية لنظرية نيوتن.[1]

ولكن كانت هناك مسألة بسيطة تطل برأسها في الأفق؛ ألا وهي: مدار عطارد. يمتلك عطارد مدارًا ممدودًا للغاية، وأقرب نقطة له من الشمس - الحضيض - تتغير بمقدار ٥٦٠٠ ثانية قوسية في القرن الواحد كما نرى من الأرض (نحو مرة ونصف من قطر القمر). أظهرت أفضل حسابات لوفيرييه أن الكواكب المعروفة وقانون نيوتن لا يمكن أن يفسرا سوى تقدم قدره ٥٥٥٧ ثانية قوسية. كانت الثقة في نظرية نيوتن كبيرة لدرجة أن كوكبًا داخليًا غير مكتشف يُدعى فولكان، افتُرض أنه يفسر هذا الفارق الصغير.[2] توفي لوفيرييه مؤمنًا بأن فولكان سيُكتشَف، لكن ذلك لم يحدث. في الواقع، كانت نظرية نيوتن معيبة.

في عام ١٩٠٧، كان أينشتاين على بُعد عامين فقط من «عام المعجزات» الذي عاشه، وهو العام الذي قام فيه بإعادة تعريف الفيزياء، لكنه لم يكن يحاول تحسين قانون نيوتن للجاذبية. كان يعمل في مكتب براءات الاختراع في برن ممَّا منحه وقت فراغ وفير. إلى أن باغتته تلك الفكرة التي أُطلِقَ عليها لقب «أسعد أفكاره»، والتي ترى أن الشخص الذي يسقط خلال عملية السقوط الحر لن يشعر بوزنه، وهذه الفكرة هي التي دفعته نحو طريقة ثورية جديدة للتفكير في الجاذبية.

بعد ثماني سنوات كان أينشتاين يعيش في حالة من الفوضى، لقد قام بمعظم أعماله السابقة مستقلًا، ثم تبنته الأوساط الأكاديمية أخيرًا، وأصبح أستاذًا للفيزياء في براج، لكنه كان يعيش وضعًا غير مستقر، فقد كانت معاداة السامية آخذة في ازدياد في أوروبا، وقد تعرض لها أينشتاين على نحو مباشر. وقد يصعب على البعض تصديق أن أينشتاين قد واجه معاناة في العمليات الرياضية للنسبية العامة، كان في أفضل حالاته يعتمد على حدسه الفيزيائي غير العادي. ولسنوات ظل يضع مخططات أولية للنظرية، لكنها كانت لا تخلو من العيوب والسهو. وفي صيف عام ١٩١٥ ألقى سلسلة من المحاضرات حول النسبية في جامعة جوتنجن، وفي نوفمبر ١٩١٥ حقق تقدمًا قويًّا قدمه في محاضرته الرابعة في الأكاديمية البروسية للعلوم، بعنوان «معادلات حقل الجاذبية». كان اختباره الحاسم لهذه المعادلات هو تحديد ما إذا كانت تستطيع تفسير التغيُّر الشاذ في مدار عطارد. تنبأت النظرية بتأثير يبلغ ٤٣ ثانية قوسية لكل قرن، وهو ما يساوي بالضبط الفرق بين ما رُصد وما تنبأت به نظرية نيوتن. قال أينشتاين لزميل له عن هذه المرحلة: «لقد ظللت لأيام أطير فرحًا وحماسًا. فنتائج حركة عطارد عند الحضيض ملأتني بارتياح كبير. يا لها من فوائد نجنيها من دقة علم الفلك المتحذلقة، والتي كنت في السابق أسخر منها في سِرِّي!».[٢]

في نظرية نيوتن تعتبر الكتلة مصدر الجاذبية، أما في نظرية أينشتاين تعتبر الكتلة جزءًا من كمية أكثر عمومية تسمى «موَتِّر الطاقة-الزخم». فكِّر في الموتر كنسخة بارعة من متجه لديها معلومات حول كمية مادية في كل موقع في الفضاء. تُعرَّف الكتلة في النسبية العامة بالزمكان المنحني، ولديها طاقة وزخم في كل اتجاه من الاتجاهات الثلاثة؛ لذلك ففي نظرية أينشتاين يتطلب الأمر عشر معادلات لوصف العلاقة بين الكتلة والزمكان. هذا أبعد ما يمكن أن نتعمق فيه دون القفز في حفرة من المعادلات التفاضلية الجزئية المصاحبة من الدرجة الثانية.

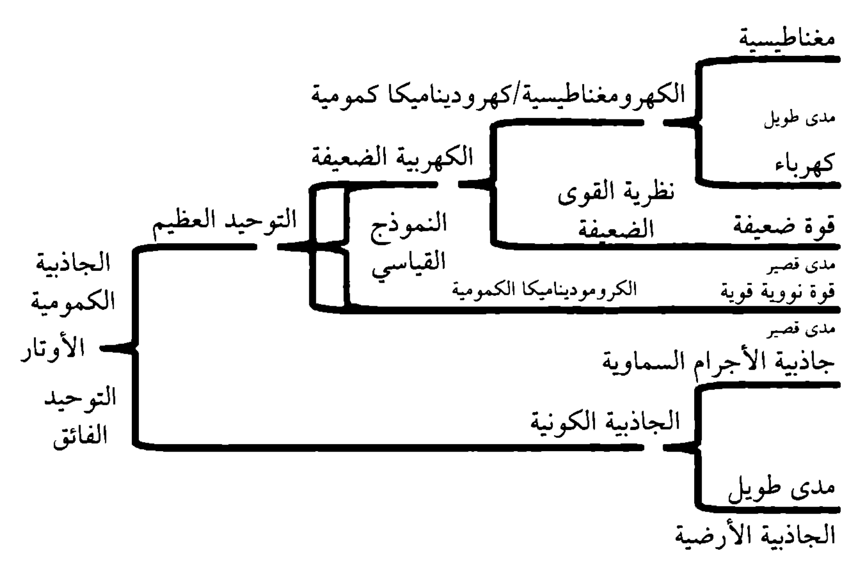
كانت النسبية العامة مجرد واحدة من النظريتين الفيزيائيتين التأسيسيتين في أوائل القرن العشرين، بينما كانت النظرية الأخرى هي ميكانيكا الكم التي تفسر سلوك الذرات والجسيمات دون الذرية. لكن هاتين النظريتين اللتين تتناولان الأجسام الكبيرة والجسيمات الصغيرة ليستا متوافقتين. فالنسبية «سلسة» لأن الأحداث والفضاء مستمران وحتميان؛ فكل ما يحدث له سببٌ محدد من محيطه. أما ميكانيكا الكم فهي «خشنة» لأن التغيرات تحدث بشكل منفصل عن طريق القفزات الكمية، والنتائج

احتمالية وليست محددة. والمثال الأكثر غرابة على هذا التنافر بين النظريتين هو التشابك الكمومي، والذي يمكن أن تقترن فيه خصائص الجسيمات عبر مسافات كبيرة على نحو آني.[٤] ولقد سخر أينشتاين من ذلك ووصفه بأنه «سلوك مخيف يحدث على بعد» وكان مقتنعًا بأنه توجد نظرية أعمق للطبيعة من شأنها إزالة غرابة ميكانيكا الكم.

لكنه فشل في مساعيه، فعلى الرغم من محاولاته العديدة لم يستطع أينشتاين العثور على عيوب قاتلة في نظرية الكم، أو حتى إثارة شكوك كبيرة حولها. وحاول تعميم نظريته الهندسية للجاذبية لتشمل الكهرومغناطيسية، ما أدى به إلى إحباط وعزلة أخذا يتراكمان عليه شيئًا فشيئًا خلال عمله على هذا البحث. وعندما توفي في برنستون عام ١٩٥٥، ترك مجموعة من المعادلات التي لم تُحل على السبورة.

إن عباءة التوفيق بين هاتين النظريتين العظيمتين، أو ربما عبء ذلك، قد تناولته الأجيال التالية من علماء الفيزياء. فالهدف النهائي هو إيجاد «نظرية لكل شيء» والتي من شأنها أن تفسر جميع الظواهر الفيزيائية. توجد أربع قوى أساسية في الطبيعة؛ اثنتان تنطبقان على المستوى دون الذري: القوى النووية القوية والضعيفة، واثنتان تنطبقان على المسافات الكبيرة جدًّا: الكهرومغناطيسية والجاذبية. اقترب الفيزيائيون بعض الشيء نحو توحيد هذه القوى في النصف الثاني من القرن العشرين، أظهرت تجارب المسرعات في سبعينيات القرن العشرين أن الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة المسئولة عن النشاط الإشعاعي هما مظهران للقوة الكهربية الضعيفة. كادت التجارب الإضافية أن تنجح في دمج القوة النووية القوية في هذا المزيج. ويسمى هذا البناء «النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات».[٥] ولكن الجاذبية تقاوم بعناد أن تكون جزءًا من هذا النموذج. لم يسبق لأحد أن رأى الجرافيتون، وهو الجسيم الافتراضي الذي يحمل قوة الجاذبية. قد يحدث التوحيد الذي يتضمن الجاذبية فقط عندما تكون درجة الحرارة ١٠^{٣٢} كلفن (شكل ٤٤). والوضع الوحيد الذي نعرفه عند درجة الحرارة هذه هو ١٠$^{-٤٣}$ ثوانٍ بعد الانفجار العظيم، عندما كان الكون بحجم جسيم أساسي واحد وعندها تتعطل النسبية العامة وتحترق عند المتفردة الأولى.

هناك عدة مناهج لتفسير الجاذبية الكمومية.[٦] تتبع الجاذبية الكمومية الحلقية عملية فيثاغورس الفكرية، والذي تخيَّل قطع حجر إلى نصفين ثم إلى نصفين، ثم نصفين مرة أخرى، حتى الوصول إلى حد عدم القدرة على مزيد من التقسيم. وفي هذه الحالة تُقسَّم البوصة إلى نصفين، ثم نصفين مرة أخرى حتى الوصول إلى «الذرات»



شكل ٤٤: تتكون القوى الأساسية الأربع للطبيعة من قوتين غير محدودتين، هما الجاذبية والكهرومغناطيسية، واثنتين تعملان ضمن المجال دون الذري، وهما القوى النووية القوية والضعيفة. ولكلٍّ منها قوة مختلفة تمامًا، لكن هناك أدلة على أنها تتوحد عند الطاقات العالية للغاية لتتحول إلى «قوة عظمى». وقد شوهد توحيد القوى الضعيفة والكهرومغناطيسية في مُسرِّعات الجسيمات في سبعينيات القرن العشرين، وهناك إشارات إلى حدوث «التوحيد العظيم» مع القوى القوية.

«فريق سي إم إس/سيرن»

أو وحدات الفضاء غير القابلة للتجزئة. وتمثل الجاذبية الكمومية الحلقية محاولة لتوسيع شكليات ميكانيكا الكم مباشرة لتشمل قوة الجاذبية. أما المناهج الأكثر تطرفًا فتتكلم عن نظرية الأوتار وأبعاد الفضاء الإضافية التي تتخطى الأبعاد الثلاثة المألوفة. ويعد الانتقال من نيوتن إلى أينشتاين ثم إلى أبعد من ذلك - من الجامد والخطي إلى المرن والمنحني إلى المتلاشي والخشن - أهم مشروع لم يكتمل حتى الآن في الفيزياء. لقد كان التقدم بطيئًا والعمل صعبًا للغاية.

لقد رأينا في الفصل الأول أن الثقوب السوداء ليست مجرد حالات من الجاذبية الشديدة، ولكنها أيضًا حالات تكون فيها الآثار الكمومية مهمة. وأي نظرية جديدة توفق بين العالَم «السلس» للزمكان المنحني مع العالَم «الخشن» للجسيمات دون الذرية، ستواجه التحدي الأكثر أهمية المتمثل في حالة الثقوب السوداء.

قال أينشتاين ذات مرة هناك: «شيئان فقط قد لا يكون لهما أي حدود، ألا وهما: الكون والغباء البشري»، ولكنه لم يكن متأكدًا بشأن الكون.[٧] يحاول بعض أذكى البشر على الكوكب التوصل إلى نظرية الجاذبية الكمومية. ربما ينجحون، وربما قد لا ينجحون. وفي الوقت نفسه، يمكن إحراز تقدم من خلال اختبار ومحاولة كسر النسبية العامة. فكما قال فيزيائي عظيم آخر، وهو ريتشارد فاينمان: «إننا نحاول إثبات خطأ أنفسنا بأسرع وقت ممكن؛ لأننا بهذه الطريقة فقط يمكننا أن نحقق تقدمًا».[٨]

ماذا تفعل الثقوب السوداء في الزمكان؟

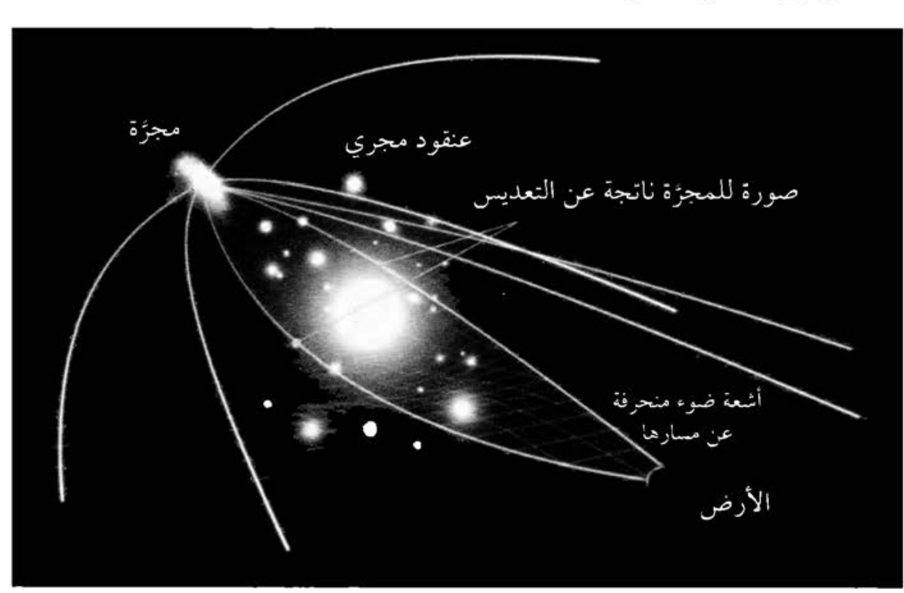
يمكن تعريف الثقب الأسود على أنه منطقة للزمكان الذي قد انحنى لدرجة أنه «اقتُطِع» من بقية الكون. ولكن حتى على مسافة من الثقب الأسود، فإن انحناء الزمكان سيتسبب في انحراف الجسيمات والضوء، عندما طور أينشتاين النسبية العامة، لم تكن هناك ثقوب سوداء معروفة. لذا خضعت نظريته للاختبار من خلال تأثير بسيط؛ ألا وهو الانحراف الطفيف للضوء القادم من نجم بعيد بينما يقترب من الشمس خلال طريقه إلى الأرض. يُلاحظ ذلك بسهولة بالغة خلال الكسوف الشمسي، عندما تختفي الشمس خلف القمر ويكون النجم الخلفي مرئيًّا.[٩] في عام ١٩١٩، أي بعد ثلاث سنوات فقط من نشر نظرية النسبية العامة، قاس آرثر إدنجتون وزملاؤه هذا الانحراف في الوقت نفسه من البرازيل وجنوب أفريقيا. فجاءت النتائج مطابقة لما تنبأ به أينشتاين.[١٠]

احتلت هذه النتائج صدارة الصفحات الأولى في معظم الصحف، وازداد الأمر درامية ولا شك بسبب رمزية تأكيد عالم بريطاني لعمل عالم ألماني مع نهاية حرب طويلة ودامية. أصبح أينشتاين من المشاهير بين عشية وضحاها. لقد كان واثقًا جدًّا من النتيجة؛ فعندما سُئل عن رد فعله لو لم تتأكد النسبية العامة خلال هذه التجربة، قال: «كنت سأشعر حينها بالأسف على الرب، فالنظرية صحيحة على أي حال».[١١]

الكتلة تحني الضوء، مع التسليم بأهمية هذه الحقيقة بالنسبة لنظرية أينشتاين وسمعته، سنراه أمرًا مدهشًا أنه كان بطيئًا في إدراك الآثار الأوسع نطاقًا. كان يعلم أنه إذا مرت أشعة الضوء بالقرب من جسم ضخم بما فيه الكفاية، فقد ينحني على نحو يكفي لتجمعها وإنتاج صورة مُكبرة، أو صور متعددة، لمصدر الضوء الخلفي. بما أن العملية تشبه انحناء الضوء عبر عدسة، فقد أطلق عليها الباحثون «التعديس الثقالي، أو عدسة الجاذبية». وبناءً على طلب مهندس زميل، نشر أينشتاين أخيرًا ورقة بحثية عن

هذه الظاهرة في عام ١٩٣٦، مع هذه المقدمة الخجولة على نحو لافت للنظر والتي تقول: «منذ وقت مضى، زارني آر دبليو ماندل وطلب مني أن أنشر نتائج عملية حسابية صغيرة قمت بها بناءً على طلبه. وهذه المذكرة تتوافق مع رغبته».[١٢] كما كتب مذكرة متواضعة لرئيس تحرير الدورية ينتقد فيها ذاته قائلًا: «اسمح لي أيضًا أن أشكرك على تعاونك مع هذه الورقة البحثية البسيطة التي أجبرني السيد ماندل عليها؛ فهي ذات قيمة ضئيلة، ولكنها جعلت ذلك الرجل البائس سعيدًا».[١٣]

لقد كان أينشتاين مخطئًا جدًّا بشأن قيمة التعديس الثقالي؛ فقد أصبح أداة أساسية في الفيزياء الفلكية الحديثة، كما استُخدم لرسم خريطة للمادة المظلمة في المجرَّات وعبر الكون، ولقياس هندسة وتمدد الكون، ولتحديد الطاقة المظلمة، ولإجراء عمليات مسح للأقزام البنية والأقزام البيضاء، واكتشاف الكواكب الخارجية الأصغر من الأرض (شكل ٤٥).



شكل ٤٥: وفقًا للنظرية العامة للنسبية، تحني الكتلة تحني. إذا كان جرم ضخم كعنقود مجرِّي يقع بيننا وبين مجرَّة أكثر بعدًا، فإن الزمكان سيتشوه والضوء المنبعث من المجرَّة البعيدة سينحني حول العنقود المجري. وهذا يؤدي إلى تشكُّل صور مشوَّهة ومكبرة. ونظرًا لأن تأثير التعديس تسببه كل الكتلة، وليس فقط المادة المرئية، فإن هذه طريقة من طرق قياس مقدار المادة المظلمة في الكون.

«إل كالاكادا/ناسا/وكالة الفضاء الأوروبية»

اعتقد أينشتاين أن تأثير التعديس الثقالي سيكون أصغر من أن يكون قابلًا للقياس، لكن في غضون أشهر من بحثه، أدرك عالم الفلك فريتز زفيكي من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا أن مليارات النجوم مجتمعة داخل المجرَّات يمكن أن تسبب تأثير تعديس يمكن ملاحظته. ففي مقال سابق، أوضح بشكل أساسي جميع الاستخدامات الحديثة للتعديس الثقالي.[١٤] ومع ذلك، فقد استغرق رصد تأثير التعديس الثقالي أكثر من أربعين عامًا، حيث حدث ذلك في عام ١٩٧٩. كانت أداة ذلك هي ثقب أسود فائق الضخامة على بُعد مليارات من السنوات الضوئية.

عثر مجموعة من الباحثين بقيادة عالم الفلك الراديوي البريطاني دنيس والش، على كوازارين لهما طيفان متطابقان باستخدام التلسكوب الذي يبلغ قطره ٢,١ متر في كيت بيك. كانت احتمالات العثور على كوازارين لهما طيفان متطابقان وقريبان للغاية في السماء منخفضة جدًّا، منخفضة جدًّا لدرجة أنه في طريقه إلى كيت بيك، كتب والش رهانًا على سبورة زميله ديريك ويلز جاء فيه: «لو لم نجد كوازارًا، سأدفع لديريك ٢٥ سنتًا. ولو عثرت على كوازار واحد، سيدفع لي ديريك ٢٥ سنتًا. ولو عثرت على كوازارين، سيدفع لي دولارًا». يقول والش عن ذلك متذكرًا: «عندما اتصلت بديريك في صباح اليوم التالي وأخبرته بما عثرنا عليه ضحكنا وقلت له: «أنت مدين لي بدولار. لنفترض أنني قلت لك: «لو عثرت على كوازارين لهما الانزياح نفسه نحو الأحمر، ستدفع ١٠٠ دولار» هل كنت ستوافق؟ قال: «بالطبع». أضعت ٩٩ دولارًا ولكنني حافظت على صديق ... كان لدي أربعة أبناء مراهقين، ولم يكن منهم من يهتم بالعلم بشكل خاص؛ لذلك عندما سألوني «ما فائدة ظاهرة التعديس الثقالي؟» استطعت أن أقول حينها: «لقد ربحت المال منها»»».[١٥]

بدا الكوازاران كتوأمين متطابقين، ولكنهما لم يكونا كوازارين تصادف أن لهما الطيف نفسه، بل كانا أشبه بسراب. أخذ ضوء كوازار واحد مسارين مختلفين حول مجرَّة متداخلة، ممَّا أعطى صورتين. إن المجرَّة الضخمة تحني الضوء على نحو طفيف يبلغ جزءًا من ألف من الدرجة. في عدسة الجاذبية الأولى هذه، يسافر الضوء لمدة ٨,٧ مليارات سنة للوصول إلينا، لكنه يسير ما يزيد قليلًا عن سنة ضوئية متجاوزًا جانبًا من المجرَّة مقارنة بالجانب الآخر. ونظرًا لأن ضوء الكوازار يختلف في السطوع، فهناك تأخير زمني يزيد قليلًا عن سنة في الاختلافات التي تظهر في صورة مقارنة بالصورة الأخرى. وقد استُخدم هذا لقياس معدل تمدد الكون ببراعة.[١٦]

إن التعديس الثقالي أمر نادر؛ لأنه يعتمد على محاذاة شبه تامة بين الكوازار الخلفي والمجرَّة الأمامية. ومن خلال دراسة آلاف الكوازارات، عُثر على أقل من ١٠٠ حالة من حالات التعديس الثقالي. وفي دزينة منها، تكون المحاذاة مثالية؛ لذا بدلًا من تعدد الصور، تحوِّل المجرَّة المتداخلة نقطة الكوازار إلى «حلقة أينشتاين»[١٧]، وهذا يعد مثالًا رائعًا على تطبيق النسبية العامة. واعتمادًا على الشكل الهندسي، يظهر الضوء الناتج عن تراكم الطاقة بالقرب من ثقب أسود فائق الضخامة في صورة قوس أو صور متعددة أو حلقة مثالية.

عندما بدأ تلسكوب هابل الفضائي العمل في تسعينيات القرن العشرين، اكتشف نوعًا آخر من حالات التعديس، بدلًا من تعديس ضوء كوازار واحد إلى صور متعددة، يتم تعديس ضوء العديد من المجرَّات البعيدة بواسطة عنقود مجري متداخل. في بعض الأحيان تتشكل صور متعددة، ولكن في كثير من الأحيان يُقطع ضوء المجرَّة الخلفية في صورة قوس. وصورة هذا النوع من العدسات تكون في صورة عنقود مجري



شكل ٤٦: تنبأ فريتز زفيكي بالتعديس الثقالي بواسطة العناقيد المجرية عام ١٩٣٧، ولكن لم تُرصد هذه الظاهرة حتى طوَّر علماء الفلك قدرة التصوير القوية لتلسكوب هابل الفضائي في ثمانينيات القرن العشرين. في هذه الصورة، يتسبب العنقود المجري «أبيل ٢٢١٨» (Abell 2218) في تشويه وتكبير العديد من المجرَّات البعيدة. تشكل الأقواس الخاضعة للتعديس دوائر متحدة المركز حول مركز كتلة العنقود. وفي بعض حالات التعديس، يمكن أن يكون لإحدى المجرَّات البعيدة خمس أو سبع صور منفصلة.

«دبليو كوتش، آر إيليس/ناسا/وكالة الفضاء الأوروبية»

محاط بأقواس صغيرة مرتبة في دوائر متحدة المركز حول مركز العنقود (شكل ٤٦). وكل صورة مشوهة تمثل تجربة في مجال بصريات الجاذبية. وأظهرت عدة مئات من العناقيد المجرية هذه الأقواس؛ لذا جمع علماء الفلك عشرات الآلاف من الأمثلة حول انحناء الضوء بفعل الكتلة.[١٨]

جميع الكتل تحني الضوء، سواء كانت مرئية أم لا؛ لذلك يعدُّ التعديس أفضل أداة يمتلكها علماء الفلك لرسم خريطة للمادة المظلمة في المجرَّات وفي العناقيد المجرية وفي الفضاء بين المجرَّات. يقدم التعديس أفضل دليل على وجود المادة المظلمة وعلى أنها عنصر سائد ومنتشر في الكون.

كيف تؤثر الثقوب السوداء على الإشعاع؟

إن أفق حدث الثقب الأسود هو المكان الذي يتوقف فيه الزمن ويتجمد عنده الإشعاع، وفرضية النسبية الخاصة لأينشتاين تنصُّ على أن للضوء سرعة كونية ثابتة تبلغ ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية. ولكن الضوء الذي يغادر الثقب الأسود يقاوم الجاذبية بقوة لدرجة أن سرعته تتقلص وطاقته تُستنزف. ويسمى هذا التأثير «الانزياح الثقالي نحو الأحمر»، ويعتبر أفق حدث الثقب الأسود مكانًا يكون فيه الانزياح نحو الأحمر غير محدود ويُحتجز الضوء هناك.

دون وجود ثقب أسود لاختبار النظرية، كيف يمكننا أن نفهم ماذا تفعل الجاذبية في الإشعاع؟ دعنا نستخدم تجربة خيالية موجودة على الأرض. تخيَّل برجًا نرسل فيه فوتونًا من أسفل إلى أعلى، ونحول طاقته إلى كتلة (وفقًا للمعادلة $E = mc^2$)، ثم اترك الكتلة تسقط إلى أسفل البرج، ثم أعده إلى فوتون. يبدو هذا واضحًا. لكن مهلًا، لو أسقطنا الكتلة، فإنها تكتسب سرعة وتكتسب طاقة جاذبية. تساوي الكمية المكتسبة mgh، حيث m هي الكتلة، وg هو التسارع بسبب جاذبية الأرض، و h هو ارتفاع البرج. عندما نعيد الكتلة إلى فوتون مرة أخرى، فإنها تمتلك طاقة أكبر. يمكننا مواصلة القيام بذلك مرارًا وتكرارًا وخلق الطاقة وربح الكثير من الأموال! بما أن أحدًا لم يكسب المال عن طريق إرسال الضوء صعودًا وهبوطًا، فلا بد أنه يوجد خلل في افتراضاتنا. الطريقة الوحيدة للحفاظ على الطاقة - بمعنى آخر، إبقاء كمية الطاقة كما هي - في هذا السيناريو هي افتراض أن الضوء يتأثر بالجاذبية، بمعنى أنه يفقد الطاقة

وهو يتسلق لأعلى بعيدًا عن سطح الأرض. يعني فقدان الطاقة أن الضوء يتحول إلى طول موجي أطول أو أكثر احمرارًا، هذا هو الانزياح الثقالي نحو الأحمر.

تخيَّل ساعة تتحرك على أساس تردد الضوء، ضع الساعة في أسفل البرج. إذا راقبنا من الأعلى، سنجد الفوتونات تفقد الطاقة وهي تصل إلينا، وبالتالي فإن ترددها يقل. فنرى الساعة تعمل بشكل أبطأ. على العكس من ذلك، إذا كنا في أسفل البرج ننظر لأعلى، فإن الساعة في الأعلى ستعمل على نحو أسرع قليلًا. مرور الوقت ببطء أكثر في الجاذبية القوية يعد تنبؤًا آخرَ للنسبية العامة. ثمة مثال ممتع يُنسب إلى الفيزيائي ريتشارد فاينمان وهو التنبؤ بأن مركز الأرض أصغر عمرًا من سطح الأرض بسنتين ونصف.[١٩] ويُطلق على هذا «تمدد الزمن الثقالي»، يرتبط تأثيرا تمدد الزمن والانزياح نحو الأحمر ارتباطًا وثيقًا؛ فللضوء والأشكال الأخرى من الإشعاع الكهرومغناطيسي طول موجي يتناسب عكسيًّا مع تردده. فكلما تناقصت طاقة الضوء في نضاله ضد الجاذبية، فإن طوله الموجي يصبح أطول أو أكثر احمرارًا، ويقل تردده، وهو الأمر الذي يماثل القول بأن «ساعة» الضوء تتحرك بشكل أكثر بطئًا.[٢٠]

تمت أول عملية رصد للانزياح الثقالي نحو الأحمر عن طريق والتر آدمز عام ١٩٢٥، حيث قام بقياس التغير في خطوط طيف القزم الأبيض القريب «الشعرى ب» أو «سيريوس ب» (Sirius B). ونظرًا لكونه جزءًا من نظام ثنائي، فإن كتلته معروفة، والتغير يساوي بضعة أجزاء في طول موجي قدره ١٠٠٠٠، مقارنة مع بضعة أجزاء في المليون لنجم أقل انضغاطًا مثل الشمس. لسوء الحظ، كان القياس معيبًا بسبب تلوث الضوء بضوء المصاحب الأكثر إشراقًا «الشعري أ» أو «سيريوس أ» (Sirius A)؛ لذلك لم ير العلماء في هذا تأكيدًا للتأثير.

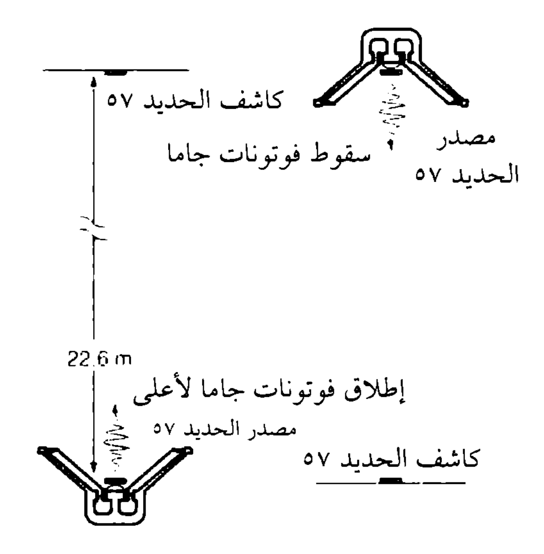
كان أول اختبار معملي للنسبية العامة تجربة أجراها روبرت باوند وطالب الدراسات العليا لديه جلين ريبكا في عام ١٩٥٩، حيث قاسا التغير في طيف أشعة جاما من الحديد المشع الذي يتحرك ٢٢,٥ مترًا فوق برج في حرم هارفارد. أكد الفقد الضئيل للطاقة، الذي يقل عن ٣ أجزاء في ١٠[١٥]، تنبؤ النسبية العامة عند مستوى ١٠٪ (شكل ٤٧).[٢١] ثم حدثت تطورات إيجابية باستخدام الساعات الذرية كمسبار للجاذبية. في عام ١٩٧١، اكتسبت ساعة ذرية من السيزيوم ساقطة من ارتفاع عالٍ من متن طائرة تجارية ٢٧٣ نانوثانية مقارنة بساعة مماثلة لها في مرصد البحرية الأمريكية[٢٢]، وفي عام ١٩٨٠، استخدم اختبار أفضل ساعة ميزر طارت على صاروخ لتحسين التوافق مع

النسبية إلى ٠,٠٠٧٪.[٢٣] أما المقاييس الحالية الحديثة فتقيس التداخل الكمومي للذرات، وقد تأكدت النسبية العامة بدقة هائلة تقل عن جزء من مليون بالمائة.[٢٤] فأصبحنا نستطيع أن نبين أن الساعة تعمل على نحو أسرع عندما نرفعها إلى أقل من متر!

ولقد شارك الفلكيون في هذا العمل أيضًا. تعد العناقيد المجرية الأجرام الأكثر ضخامة في الكون، وينبغي أن تفقد الفوتونات المنبعثة من مركز العنقود المجري - حيث توجد العديد من المجرَّات - طاقة أكثر من الفوتونات المنبعثة من الحافة، حيث يوجد عدد أقل. بحثت مجموعة في معهد نيلز بور بقيادة راديك ووِيْتاك عن هذا التأثير، وقد كان ضئيلًا للغاية لدرجة أنه كان عليهم الجمع بين بيانات ٨٠٠٠ عنقود مجري لرصده.[٢٥] مرة أخرى، تأكدت نظرية أينشتاين.

ثمة تجربة تخيُّلية جيدة تدفع من يسمع عنها لأن يقول: «بالطبع، هذا بديهي!». تذكر رد فعل عالم الأحياء الإنجليزي توماس هكسلي عندما سمع عن نظرية داروين حول الانتقاء الطبيعي عندما قال: «كم كنا أغبياء لأننا لم نفكر في ذلك!».[٢٦] في مصاعد أينشتاين، يُكشف جمال النسبية العامة؛ فالمصعد الذي يسقط سقوطًا حرًّا باتجاه الأرض مماثل للمصعد الذي ينجرف في الفضاء السحيق؛ لأن قوة الجاذبية أُزيلت. والمصعد الذي يخضع للتسريع في الفضاء بسرعة ٩,٨ أمتار في الثانية مماثل للمصعد الموجود على الأرض؛ لأنه لا يمكن تمييز التسارع الناجم عن الجاذبية والتسارع الناجم عن أي قوة أخرى. في الحالة الثانية، تخيَّل أنك تضيء مصباحًا عبر المصعد، وخلال اللحظة التي يستغرقها الضوء للوصول إلى الجانب الآخر، يتسارع المصعد، وبالتالي فإن الضوء يتخذ مسارًا منحنيًا لأسفل عبر المصعد. تقول نظرية أينشتاين إن الشيء نفسه يجب أن يحدث مع المصعد الثابت على الأرض؛ حيث «يسقط» الضوء بسبب الجاذبية. أو بلغة النسبية، تحني كتلة الأرض الفضاء وينحني الضوء قليلًا لأنه يتبع الزمكان المنحني بالقرب من الأرض.

فيما سبق وصفنا «الاختبارات الكلاسيكية» الخاصة بالنسبية العامة. استخدمت هذه الاختبارات المواقف التي تكون فيها الجاذبية ضعيفة للغاية، لدرجة أن انحناء الزمكان وتشوُّهه يكونان طفيفين وتوجد حاجة إلى قياسات دقيقة للغاية. منذ ما يقرب من خمسين عامًا، اقترح إيروين شابيرو، الذي شغل منصب مدير مركز هارفارد سميثونيان للفيزياء الفلكية لمدة طويلة، اختبار جاذبية ضعيفة بارع لهذه النظرية. فقد أدرك أنه سيحدث تأخير بسيط في وقت سفر إشارات الرادار ذهابًا وإيابًا، والتي تنعكس



شكل ٤٧: كان أول اختبار تجريبي للنسبية العامة في عام ١٩٥٩ هو أدق تجربة فيزياء تمَّ إجراؤها على الإطلاق في ذلك الوقت. قام الفيزيائيان في جامعة هارفارد، روبرت باوند وجلين ريبكا، بقياس طاقة أشعة جاما الناتجة عن تحلل الحديد المشع ٥٧ التي تتحرك لأعلى ولأسفل على مسافة ٢٢,٦ مترًا. كان الفوتون الذي يتحرك لأسفل ينزاح نحو الأزرق، بينما كان الفوتون الذي يتحرك لأعلى ينزاح نحو الأحمر بالكمية التي تنبأت بها النسبية العامة بالضبط. كانت الدقة التجريبية المطلوبة لهذا الاختبار عبارة عن بضعة أجزاء في ١٠^١٥.
«آر ناف/هايبرفيزيكس»

من الكواكب الأخرى إذا دفعها مسار الفوتون إلى منطقة قريبة من الشمس. وباستخدام قياسات الرادار المنعكسة من عطارد والزهرة، قبل خسوفهما بواسطة الشمس وبعده، أكد النسبية العامة عند مستوى ٥٪.[٢٧] وتكرر هذا الاختبار في النظام الشمسي الخارجي بواسطة المركبة الفضائية كاسيني التابعة لناسا ونتج عنه توافق مع النظرية عند مستوى يبلغ ٠,٠٠٢٪.[٢٨]

تؤكد هذه الاختبارات النسبية العامة وتؤكد تفوقها على نظرية نيوتن كذلك، ولكن ثمة شيء غامض غير مُرضٍ بشأن اختبار النسبية في الأماكن التي يكون فيها الفضاء مسطحًا مثل حقل ذرة أيوا، فهذا يشبه اختبار قيادة سيارة لامبورجيني في ساحة انتظار السيارات. إنها بالتأكيد أفضل من أداء سيارتك الفورد توروس القديمة، لكن ذلك يحدُّ من معايير الاختبار. فمن الأفضل كثيرًا قيادة السيارتين بسرعة في الجبال،

حيث تتسلق اللامبورجيني التلال وتعانق المنحنيات، في حين أن الفورد توروس سترتفع حرارتها وتنزلق عن الطريق. يتطلع علماء الفلك إلى اختبار النظرية في النهاية باستخدام الثقوب السوداء، حيث يجب أن تكون تأثيرات الجاذبية على الإشعاع كبيرة وواضحة. وكما سنرى في القسم التالي، اكتُشفت انزياحات ثقالية نحو الأحمر كبيرة من الثقوب السوداء باستخدام التحليل الطيفي للقرص المزود.

داخل الستارة الحديدية

تعد المنطقة المجاورة للثقب الأسود هي الاختبار الجوهري للنسبية العامة. ما مدى القرب الذي يمكن أن نصله في عمليات الرصد؟ يحدد أفق الحدث - الذي لا يمكن لأي معلومات أن تتخطاه وتصل إلينا - الحد الأقصى. تصف النسبية العامة أيضًا العديد من النطاقات المهمة التي تتخطى أفق الحدث. أولها يسمى فلك الفوتونات، حيث يُحبس الضوء ويتحرك في مدارات دائرية حول الثقب الأسود. وبما أن الكتلة تحني الضوء، فيمكننا التفكير في حني الكتلة للضوء إلى دائرة. إذا أمكنك الذهاب إلى هناك، فقد يبدأ الفوتون عند الجزء الخلفي من رأسك، ويدور حول الثقب الأسود، ثم يدخل عينك، ممَّا يتيح لك رؤية الجزء الخلفي من رأسك. بالنسبة للثقب الأسود الثابت، فإن فلك الفوتونات له نصف قطر يبلغ ١٫٥ ضعفَ نصف قطر شفارتسشيلد.[٢٩] أما الثقب الأسود الدوار فله اثنان من أفلاك الفوتونات، ويسحب الفضاء معه أثناء دورانه. يتحرك فلك الفوتونات الداخلي في اتجاه الدوران ويتحرك فلك الفوتونات الخارجي عكس اتجاه الدوران. تخيَّل سباحًا يحاول الهرب من دوامة، إذ يحافظ على مكانه بالسباحة ضد التيار، فلو أنه سبح مع التيار فسيقترب من موته المحتوم. ونظرًا لأن الفوتونات محبوسة، لم يُرصد فلك الفوتونات أبدًا.

ندخل في عالم الرصد على الحافة الداخلية للقرص المزود. عندما تُسحب الجسيمات نحو الثقب الأسود عن طريق الجاذبية، فإن بعضها يحتك ببعض، ومن هذا نستنتج أن القرص المزود عبارة عن بلازما تنخفض درجة حرارتها كلما اتجهت للخارج. تتحدد الحافة الداخلية من خلال مدار مستقر أعمق يبلغ نصف قطره ٣ أضعاف نصف قطر شفارتسشيلد بالنسبة للثقب الأسود الذي لا يدور، ويتخطى قليلًا أفق حدث ثقب أسود سريع الدوران.[٣٠] وداخل هذا المدار المستقر، يغرق الجسيم في

الثقب الأسود ويختفي إلى الأبد. وتبلغ درجة حرارة الحافة الداخلية للقرص المزود في الثقب الأسود ذي الكتلة المنخفضة ١٠ ملايين كلفن، أما بالنسبة للثقب الأسود فائق الضخامة فدرجة حرارته تصل إلى ١٠٠ ألف كلفن. والغاز الذي يصل إلى هذه السخونة تنبعث منه كميات وفيرة من الأشعة السينية.

هل يمكن أن نرى الحافة الداخلية للقرص المزود؟ لا. فالمقياس الزاوي صغير جدًّا بحيث لا يمكن لأي تلسكوب قياسه؛ فالثقب الأسود القريب الذي يقع على بُعد ١٠٠ سنة ضوئية، له حافة داخلية تقابل زاوية تبلغ $١٠^{-٩}$ ثوانٍ قوسية. يشبه ذلك محاولة رؤية رأس دبوس على سطح المريخ. ولكن يتحسن الوضع قليلًا بالنسبة للثقب الأسود فائق الضخامة، كما هو الحال مع الثقوب السوداء غير النشطة التي اكتُشفت في مراكز المجرَّات القريبة، فهي بعيدة بملايين الأضعاف، ولكن لها آفاقَ أحداث أكبر بمليارات المرات؛ لذلك فإن أقراصها المزودة الداخلية تمتد بزاوية تتراوح ما بين $١٠^{-٧}$ و$١٠^{-٦}$ ثوانٍ قوسية، وهذا أصغر بضع مئات من المرات من دقة مقياس التداخل الراديوي المذكور سابقًا؛ لذلك لا يزال هذا بعيدًا عن متناول علم الفلك الرصدي.

إن الطريقة الوحيدة التي تمكن علماء الفلك من النظر داخل الستارة الحديدية هي استخدام التحليل الطيفي. يتكون الغاز في القرص المزود بأغلبية ساحقة من أيونات الهيدروجين والهيليوم، ولكن اثنين من كل مليون جسيم يكونان أيونات حديد. وتلك المنطقة التي بداخل القرص المزود عبارة عن هالة شديدة السخونة. والأشعة السينية المنبعثة من هذه الهالة تنير القرص المزود الأكثر برودة قليلًا وطاقاتها تكفي بالكاد لإثارة التحولات الطيفية للحديد. على الرغم من أن الحديد عنصر نادر، فإن هذه السمات الطيفية واضحة وقوية. يُظهر طيف الأشعة السينية طريقة تحرك الغاز؛ لأن الجزء القريب من القرص المزود ينزاح نحو الأزرق بينما ينزاح الجزء الأبعد نحو الأحمر. كما تعاني الأشعة السينية المنبعثة من الجزء الداخلي من القرص المزود أيضًا من انزياح ثقالي قوي نحو الأحمر، وبالتالي فإن خط طيف الحديد يتوسع ويميل أيضًا نحو الطاقات الأكثر انخفاضًا (شكل ٤٨). توفر الأشعة السينية إمكانية مثيرة لقياس الجاذبية على مسافة قريبة للغاية من أفق الحدث.[٣١]

أصبحت هذه البيانات الرصدية ممكنة بعد إطلاق «قمر الأشعة السينية الصناعي المتقدم لعلم الكون والفيزياء الفلكية» (ASCA) عام ١٩٩٣. ثم تبع ذلك أول اكتشاف للأشعة السينية من الحافة الداخلية للقرص المزود لثقب أسود فائق الضخامة بعد

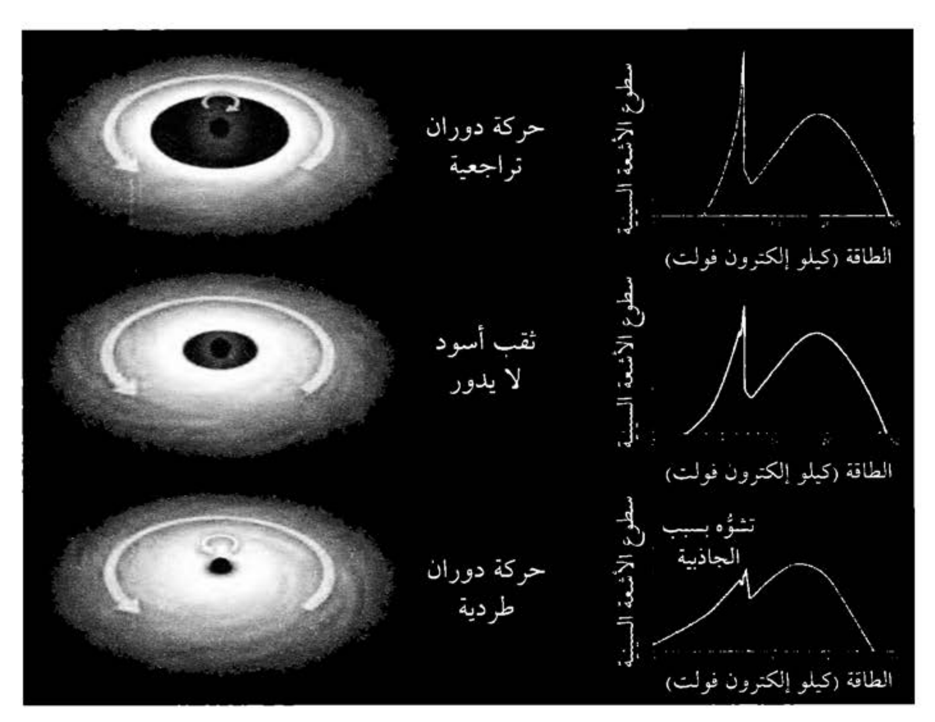
ذلك بعام واحد.[٣٢] وقد شهدنا في الوقت الراهن عشرات من حالات الانزياح الثقالي نحو الأحمر لخطوط طيف الأشعة السينية المنبعثة من ثقوب سوداء ذات كتلة نجمية، وعددًا مماثلاً من الثقوب السوداء فائقة الضخامة. بعد ذلك، أصبحت إحدى الظواهر المحيرة المتعلقة بالأشعة السينية - والتي اكتُشِفَت قبل سنوات - نافذة ثانية على مقربة من الثقبَ الأسود.

ومضات من الأشعة السينية بالقرب من الهاوية

في ثمانينيات القرن العشرين عندما بدأت أقمار الأشعة السينية في مراقبة النجوم المدمجة وبقايا النجوم، رصدت مصادر تتسم بتباين سريع في انبعاثات الأشعة السينية. لم تكن ومضات الأشعة منتظمة؛ لذلك كانت تسمى هذه الظاهرة «التذبذب شبه الدوري». ورُصدت التذبذبات لأول مرة في الأقزام البيضاء، ولاحقًا في النجوم النيوترونية والثقوب السوداء.

استغرق علماء الفلك بعض الوقت كي يتمكنوا من فهم الفيزياء الفلكية التي تقف وراء هذه التباينات، ففي مصادر مختلفة تراوحت الفوارق الزمنية من ثانية إلى أقل من ملليثانية، وكثيرًا ما ضاع السلوك الدوري في ضجيج التباينات الأكثر فوضى. أظهرت الثقوب السوداء نمطًا معينًا من السطوع والخفوت، حيث كانت تستغرق في البداية عشر ثوانٍ لاستكمال تذبذب واحد، ثم بعد أسابيع أو أشهر يتسارع التذبذب إلى عُشر ثانية قبل توقف التباينات، وبعد ذلك تتكرر الدورة. كشفت عمليات الرصد والنمذجة للثقب الأسود النموذجي «الدجاجة إكس-١» عن مصدر هذه التباينات، وكان عبارة عن نبضات يتركها الغاز بينما يترك الجزء الداخلي من القرص المزود ويدخل أفق الحدث. كم هو مثير أن نشهد سَكَرَات موت المواد التي تسقط في الثقب الأسود في وقت حدوث هذا السقوط.[٣٣]

اشتبه علماء الفلك في أن تواتر تلك التباينات قد يعتمد على كتلة الثقب الأسود. يدور الغاز حلزونيًا إلى داخل القرص المزود، ويتحرك أسرع وأسرع، ويتراكم بالقرب من الثقب الأسود، مطلقًا سيلًا من الأشعة السينية. وتكون منطقة التراكم هذه قريبة بالنسبة إلى الثقوب السوداء الصغيرة؛ لذا فإن «ساعة» الأشعة السينية تدق بسرعة. ولكنها تكون بعيدة بالنسبة إلى الثقوب السوداء الأكبر؛ لذا فإن «ساعة» الأشعة السينية



شكل ٤٨: يمكن استخدام خطوط طيف الحديد كمسبار للمنطقة الداخلية ذات درجة الحرارة العالية من القرص المزود المحيط بالثقب الأسود. يميل الخط نحو الطاقة المنخفضة بسبب الانزياح الثقالي نحو الأحمر من الثقب الأسود. وتكون الحافة الداخلية بعيدة عن الثقب الأسود عندما يدور الثقب الأسود في الاتجاه المعاكس للقرص المزود (دوران تراجعي)، وتكون أقرب عندما يدور في الاتجاه نفسه (دوران طردي). وتظهر هذه الاختلافات في طيف الأشعة السينية.

«ناسا/مختبر الدفع النفاث/معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا»

تدق ببطء. ويعد هذا السلوك موثوقًا منه للغاية لدرجة أن التباين في الأشعة السينية استُخدم لقياس كتلة الثقوب السوداء،[٣٤] بما في ذلك أصغر ثقب أسود معروف، والذي يبلغ قطره ١٥ ميلًا فقط وتبلغ كتلته ٣٫٨ أضعاف كتلة الشمس، وهذا بالكاد أعلى من الحد الأقصى للنجم النيوتروني.

مؤخرًا، قامت مجموعة بقيادة آدم إنجرام من جامعة أمستردام بدمج بيانات الأشعة السينية الخاصة بالتباين وشكل خطوط طيف الحديد. بدأ إنجرام العمل على التذبذبات شبه الدورية كأطروحة للحصول على درجة الدكتوراه في عام ٢٠٠٩، وعن

ذلك يقول: «وُصف ذلك على الفور بأنه شيء رائع لأنه قريب من الثقب الأسود». وأظهرت مجموعته - باستخدام بيانات من قمرين صناعيين للأشعة السينية - أن المادة الدوارة تُحبس في دوامة جاذبية أنشأها الثقب الأسود: «يشبه الأمر لف ملعقة صغيرة في العسل. تخيَّل أن العسل يمثل الفضاء وأن أي شيء موجود في العسل «سيُسحب» للداخل بواسطة المعلقة الدوارة». اختار الفريق ثقبًا أسود ذا فترة تذبذب مدتها أربع ثوانٍ وراقبوه بعناية لمدة ثلاثة أشهر تقريبًا. أظهرت خطوط طيف الحديد السلوك المتوقع وفق ما تنصُّ عليه النسبية العامة بالضبط. قال إنجرام: «إننا نقيس مباشرة حركة المادة في حقل الجاذبية القوي بالقرب من الثقب الأسود».[٣٥] ولا يزال هذا أحد الاختبارات القليلة للغاية التي تختبر نظرية أينشتاين في هذا النظام.[٣٦]

كما رُصدت تذبذبات شبه دورية في المجرَّات النشطة أيضًا، ولكن النطاقات الزمنية للتباينات تمتد من ساعات إلى أشهر وليس ثوانيَ.[٣٧] وهذا ينطوي على دلالة مثيرة للاهتمام تتلخص في أن الأقراص المزودة تتصرف بطرق مماثلة عبر مجموعة كبيرة من الأحجام المادية المختلفة، تتنوع من الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية إلى الثقوب السوداء فائقة الضخامة في المجرَّات البعيدة.

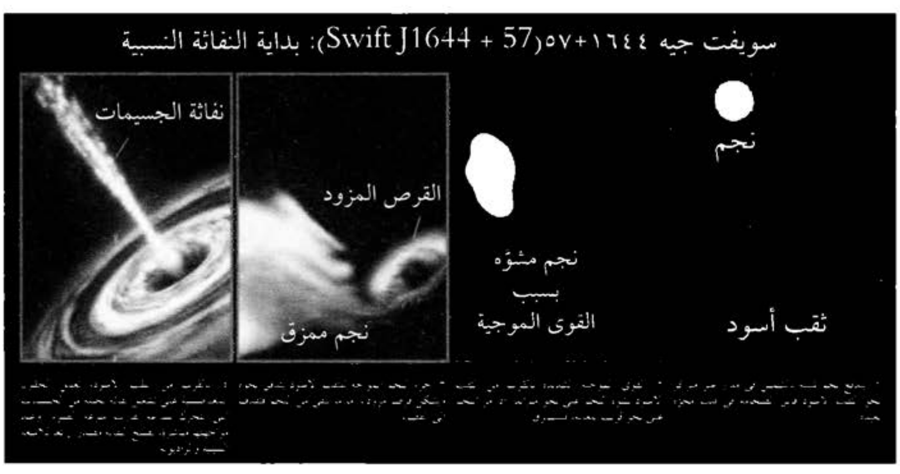
عندما يلتهم الثقب الأسود نجمًا

ماذا يحدث عندما يلتهم ثقب أسود هائل نجمًا؟ في عام ١٩٩٨، غامر مارتن ريس بالإجابة على هذا السؤال. ظل ريس يفكر لسنوات حول الكيفية التي يستطيع من خلالها رصد الثقوب السوداء المظلمة التي ينبغي أن تكمن في مركز كل مجرَّة. وفكر فيما قد يصيب أي نجم مسكين يغامر بالدخول في منطقة شديدة الجاذبية. عندما يقترب من الثقب الأسود، يُمَطُّ النجم أولًا ثم يتمزق بسبب القوى الموجية، حيث يُقذف بعض الحطام بسرعة عالية للخارج ويُبتلع الباقي في الثقب الأسود، ممَّا يسبب اضطرابًا موجيًّا عنيفًا قد يستمر لعدة سنوات.[٣٨]

تتجنب النجوم هذا المصير ما لم تتحرك بالقرب من ثقب أسود. لكل ثقب أسود دائرة اضطراب موجي (tidal disruption radius)، وخارج هذا الحد تحافظ النجوم على شكلها، ولكن بمجرد دخول النجم إلى هذه المساحة، يبدأ التدمير. يُقذف نحو نصف كتلة النجم بعيدًا، وينتقل النصف الآخر إلى مدارات إهليلجية تقوم بتوصيل

الغاز تدريجيًّا إلى القرص المزود. يتغذى الثقب الأسود على المادة الموجودة خارج أفق الحدث مباشرةً، ويؤدي تحويل طاقة الجاذبية إلى إشعاع إلى ومضة ساطعة.[٣٩] وأحيانًا يطلق هذا الحدث نفاثات نسبية (شكل ٤٩). تخيَّل أن الشمس تقترب من الثقب الأسود الموجود في مركز مجرَّتنا، لن يحدث شيء حتى تكون الشمس على بُعد ١٠٠ مليون ميل من أفق الحدث، وعندئذٍ ستتمزق الشمس وستتبعثر جميع الكواكب، بما فيها الأرض، كعملات معدنية مثورة في الهواء، مع احتمال متساوٍ لوصول أيٍّ منها إلى بر الأمان أو أن يستهلكها الثقب الأسود. إن الاقتراب بهذه الدرجة غير محتمل؛ لذا فإن أحداث الاضطراب الموجي نادرة الحدوث، حيث تحدث مرة واحدة كل ١٠٠ ألف سنة لكل مجرَّة.

بالنسبة لنجم يشبه الشمس يقترب من ثقب أسود مركزي ذي كتلة تبلغ بضعة ملايين كتلة شمسية، فإن نصف قطر دائرة الاضطراب الموجي يمتد لمسافة أكبر من نصف قطر شفارتسشيلد. لكن نصف قطر شفارتسشيلد يزداد خطيًّا مع الكتلة بينما



شكل ٤٩: تمزُّق نجم بسبب القوى الموجية الشديدة لثقب أسود فائق الضخامة في مجرَّة بعيدة يؤدي إلى اشتعال ومضة ضوئية التقطها أحد أقمار ناسا الصناعية. يدور النجم في مدار غير متراكز، ومن ثَمَّ يمر بالقرب من الثقب الأسود وتمزقه القوى الموجية الشديدة. يتحول بعض الغاز إلى قرص مزود ويضيع البعض الآخر جرَّاء تأثير جاذبية الثقب الأسود. ويشكل القرص المزود نفاثتين تسرِّعان جسيمات عالية الطاقة، والتي تبعث بعد ذلك كميات وفيرة من الإشعاع نحو الأرض.

«ناسا/مركز جودارد لرحلات الفضاء/سويفت»

يزداد نصف قطر دائرة الاضطراب الموجي ببطء أكبر؛ لذلك فإن الثقوب السوداء التي تزيد كتلتها عن ١٠٠ مليون كتلة شمسية تستهلك النجوم قبل أن تتمزق. تخيَّل أن الثقوب السوداء الكبيرة تبتلع الذبيحة بأكملها، في حين أن الثقوب السوداء الأصغر تمزق اللحم قطعًا لتأكله. كما أن مصير النجم يعتمد أيضًا على حجمه ومرحلة تطوره؛ فالنجوم الكبيرة تعاني من قوى موجية أقوى، ومن ثَمَّ فإن عملاقًا أحمر متجهًا إلى مركز المجرَّة سيتمزق في مكان أبعد من مكان تمزق الشمس، بينما سيختفي القزم الأبيض داخل أفق الحدث دون أن يتمزق. وتشير المحاكاة الرقمية إلى أن معدل تراكم المادة بعد حدث الاضطراب الموجي يرتبط بكتلة الثقب الأسود. ولو كانت المحاكاة موثوقة، فقد يُستخدم الوقت بين تمزق النجم وذروة الومضة الساطعة «لوزن» الثقب الأسود. فبالنسبة إلى نجم مثل الشمس، يكون التأخير الزمني شهرًا بالنسبة إلى ثقب أسود يبلغ مليون ضعف لكتلة الشمس، ويزداد التأخير الزمني إلى ثلاث سنوات بالنسبة إلى ثقب أسود يبلغ مليار ضعف لكتلة الشمس.

ماذا تقول عمليات الرصد؟ تم رصد نحو ٢٠ حدثَ إضرابٍ موجي باستخدام تلسكوبات الأشعة السينية، بما في ذلك حدثان كان تراكم المادة فيهما كفئًا لدرجة أن السطوع تجاوز بكثير الحد الذي حدده إدنجتون قبل قرن من الزمان.[٤٠] وأظهرت مجموعة صغيرة من الأحداث أن الزيادة في تراكم المادة يمكن أن تسبب النفاثات النسبية التي رُصدت في الكوازارات الراديوية.[٤١] كل هذه الأمثلة حدثت في المجرَّات البعيدة؛ لذلك تحمس علماء الفلك للغاية عندما أدركوا أن سحابة غاز تسمى «جي ٢» (G2) كانت تتجه نحو الثقب الأسود في مركز مجرَّتنا. في أواخر عام ٢٠١٣، مرت سحابة الغاز بالقرب من الثقب الأسود فائق الضخامة ثم ... لم يحدث شيء. ولكن بعد مرور عام أو نحو ذلك على ذلك المرور القريب، زاد معدل ومضات الأشعة السينية بعشرة أضعاف، حيث وصل إلى ومضة واحدة يوميًّا. وقد أدى ذلك إلى تكهن بأن «جي ٢» لم يكن سحابة غازية؛ بل كان نجمًا ذا غلاف كبير، بحيث استغرق الأمر وقتًا طويلًا حتى تتمزق المادة وتنزلق داخل الثقب الأسود.[٤٢] لم ينته العرض بعد؛ فبعد خمسة عشر عامًا من جمع البيانات، ينتظر علماء فلك الأشعة السينية مرورًا آخر للنجم «جي ٢». لكن هذا الاحتمال ضعيف قليلًا بسبب حقيقة أن كل شيء نشاهده في مركز المجرَّة قد حدث منذ ٢٧٠٠٠ سنة.

في هذه الأثناء، علَّق علماء الفلك البصريون أنظارهم على النجم «إس ٢» (S2)،

وهو نجم يدور حول الثقب الأسود في مركز المجرَّة كل ستة عشر عامًا. يمتلك هؤلاء العلماء حاليًّا أداة جديدة تسمى «جرافيتي» (GRAVITY) تجمع الضوء من التلسكوبات الأربعة التي يبلغ قطرها ٨٫٢ أمتار من الموجودة في التلسكوب الكبير جدًّا في المرصد الأوروبي الجنوبي لإعطاء دقة زاوية تساوي دقة تلسكوب واحد بقطر ١٣٠ مترًا. وفي عام ٢٠١٨، سيمر النجم «إس ٢» بالقرب من الثقب الأسود ويوفر فرصة غير مسبوقة لاختبار النسبية العامة. ومن المتوقع أن يمر على بُعد ١٧ ساعة ضوئية فقط من أفق الحدث، متحركًا بسرعة تبلغ ٣٪ من سرعة الضوء. وربما يتمزق أو يُبتلع تمامًا.

من المؤكد أن تدمير نجم بواسطة ثقب أسود هو أمر يأسر الخيال، ففي عام ٢٠١٥ أدى ذلك إلى قصة إخبارية بمصطلحات الطعام: «الثقوب السوداء تلتهم النجوم فتملأ فِيها تارة وتلتقم منها تارة أخرى».[٤٣] وحرَّض هذا على ظهور ذلك العنوان الرئيسي المثير في صحيفة «ديلي ميل» الإنجليزية: «أصداء مذبحة فضائية: رصد الأنفاس الأخيرة للنجوم المحتضرة التي تمزقها الثقوب السوداء فائقة الضخامة».[٤٤] بصرف النظر عن حقيقة أن النجوم ليس لديها مشاعر، ولا تُصدر أصواتًا، ولا يمكن للأصوات أن تنتقل عبر الفراغ، فالعنوان دقيق للغاية.

أن تصطحب ثقبًا أسود في جولة

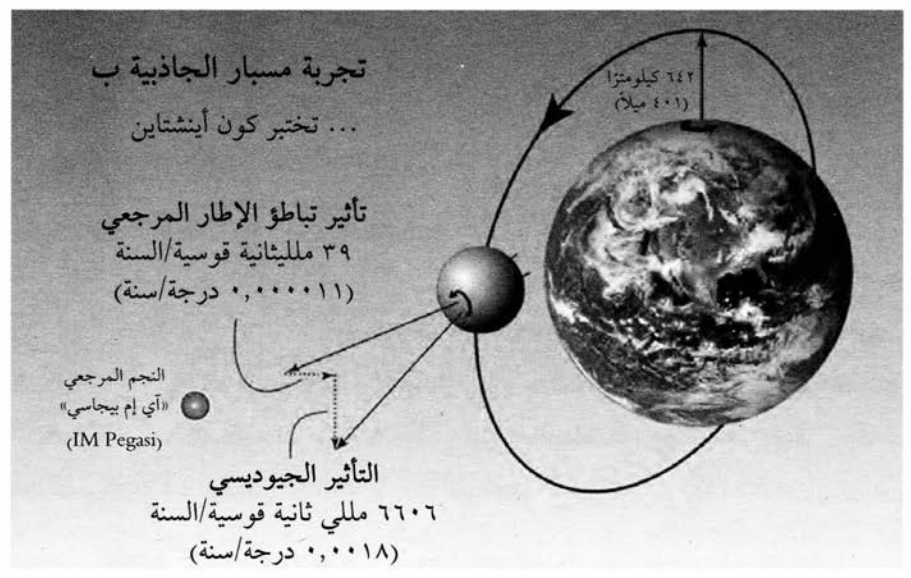
إن الثقوب السوداء بسيطة للغاية؛ فنظرية «اللاشعر» تشير إلى أنها توصف فقط من خلال رقمين، وهما: الكتلة والدوران. وقد تحدثنا في الجزء الأول من الكتاب عن طرق قياس كتلة الثقب الأسود، والتي عادة ما تتضمن مدارًا مع مصاحب مرئي، إذا كان الثقب الأسود نجمًا منضغطًا، أو تأثيره على حركة النجوم القريبة، إذا كان ضخمًا وفي مركز المجرَّة. ولكن ماذا عن الدوران؟

لا تعتمد الجاذبية على الدوران في نظرية نيوتن، ولكن في نظرية أينشتاين، جُمعت الكتلة مع هندسة الزمكان. في عام ١٩١٨، كان من المتوقع أن يؤدي دوران جُرم ضخم إلى تشوُّه الزمكان، ممَّا يسبب ما يسمى «المبادرة» في مدار جُرم أصغر، على غرار دوران محور جزء علوي دوار. هذا التشوه في محيط الفضاء يسمى «تباطؤ الإطار المرجعي». تذكر وصف بو المفعم بالحيوية للدوامة. وكما هو الحال مع التأثيرات الدقيقة الأخرى للنسبية العامة، فإن أول مكان نبحث فيه هو جوارنا.

تُشوِّه الأرض الزمكان أثناء دورانها، ولكن تأثير ذلك ضئيل للغاية لدرجة أنه منذ عقود كان من المستحيل رصده. في عام ٢٠٠٤، أطلقت ناسا قمرًا صناعيًّا يسمى «مسبار الجاذبية ب» (Gravity Probe B) لقياس انحناء الزمكان الناجم عن الأرض وتباطؤ الإطار المرجعي الأكثر ضآلة الناتج عن دورانها. كانت أدوات هذه المهمة أربعة جيروسكوبات كلٌّ منها بحجم كرة الطاولة. غالبًا ما تستخدم الجيروسكوبات لتوجيه المركبات الفضائية؛ فهي أجهزة تشير محاور دورانها في اتجاه ثابت. احتوت الجيروسكوبات الموجودة في مسبار الجاذبية ب على كرات من الكوارتز مطلية بالنيوبيوم، وكانت من بين الأشياء الأكثر دقة التي تم تصنيعها على الإطلاق، فكانت مثالية التكوير إلى درجة تقل عن ٤٠ ذرة لنصف القطر. ولو أن واحدة منها كبرت إلى حجم الأرض، فلن يكون أعلى قمة جبل أو أعمق وادٍ أكبر من طول الشخص. وكانت معلقة داخل حاوياتها في طبقة رقيقة من الهيليوم السائل. وعند درجة الحرارة هذه، أصبحت الكرات موصلات فائقة واستخدمت الحقول الكهربية والمغناطيسية التي نشأت للحفاظ على محاذاتها.[٤٥]

بدأ «مسبار الجاذبية ب» مهمته التي امتدت ستة عشر شهرًا بعد مرور خمسين عامًا على بداية تمويله.[٤٦] واستخدمت الجيروسكوبات نجمًا ساطعًا في كوكبة «الفرس الأعظم» (Pegasus). قاس القمر الصناعي انحناء الزمكان بواسطة الزاوية الصغيرة التي «مالت بها» الجيروسكوبات بسبب الجاذبية الأرضية، وقاس تباطؤ الإطار المرجعي بأصغر زاوية «تأخرت» بها الجيروسكوبات عن دوران الأرض. تسبب ضجيج غير متوقع في تقليل حساسية التجربة وبطء التحليل. ولقد أدت هذه المشكلات إلى عدم نشر النتائج النهائية حتى عام ٢٠١١، [٤٧] تأكدت تنبؤات أينشتاين بانحناء الزمكان ضمن نطاق خطأ يبلغ ٠٫٥٪ وتأكدت تنبؤاته بشأن تباطؤ الإطار المرجعي ضمن نطاق خطأ يبلغ ١٥٪ (شكل ٥٠). وعندما هدأت الأمور، ثبت أن مسبار الجاذبية ب كان يمثل نجاحًا تقنيًّا قويًّا (رغم أنه كان مُرهِقًا).

للدوران تأثيرات مختلفة بالنسبة إلى الثقوب السوداء المنخفضة والعالية الكتلة. إن الثقوب السوداء في أنظمة النجوم الثنائية أكثر ضخامة من رفقائها؛ لذلك لن يتغير دورانها كثيرًا بسبب هذا التفاعل؛ فمعدل دورانها يمثل أثرًا باقيًا مباشرًا جرَّاء تشكلها من انفجار مستعر أعظم. على النقيض من ذلك، تنمو الثقوب السوداء فائقة الضخامة على مدار الزمن الكوني من خلال استهلاك الغاز والنجوم الموجودة في الأجزاء الداخلية



شكل ٥٠: اختبر مسبار الجاذبية ب اثنين من التنبؤات الخاصة بالنسبية العامة في وضع الحقل الضعيف لمدار الأرض. استُخدِمَت الجيروسكوبات لوضع القمر الصناعي بدقة شديدة عند إطار مرجعي سماوي. وقاس القمر الصناعي المبادرة الجيوديسية، أو المقدار الذي انحرفت به الجيروسكوبات في جاذبية الأرض، وقاس تأثير تباطؤ الإطار المرجعي حيث «تأخرت» الجيروسكوبات عن دوران الأرض. تطابق كلا القياسين مع تنبؤات النسبية العامة.
«سي دبليو إف إفريت/فيزيكال ريفيو/الجمعية الفيزيائية الأمريكية»

من مجرَّتها، وكذلك من خلال عمليات الدمج مع الثقوب السوداء في المجرَّات الأخرى. وبالتالي فإن دوران الثقب الأسود فائق الضخامة يحمل تاريخ نموه من خلال عمليات تراكم المادة والاندماج. وهنا يكمن الدافع لإجراء هذا القياس الصعب.

تم قياس دوران عشرات الثقوب السوداء فائقة الضخامة، وكان القياس في معظم الأحيان يستخدم شكل خط طيف الحديد عندما ينعكس عن الحافة الداخلية للقرص المزود. تدور معظم الثقوب السوداء، التي تتراوح كتلتها ما بين مليون ومليار كتلة شمسية، بنسبة تتراوح بين ٥٠٪ و٩٥٪ من سرعة الضوء.[٤٨] وتشير معدلات الدوران السريعة هذه إلى أن الثقوب السوداء قد نمت بعد اندماج كبير واحد مع مجرَّة أخرى، حيث تصل معظم المواد الداخلة للثقب الأسود من اتجاه واحد، بدلًا من بنائه بواسطة العديد من عمليات الدمج البسيطة لمواد قادمة من اتجاهات مختلفة، والتي من شأنها أن تجعل معدل الدوران بطيئًا.

تتمثل أفضل طريقة لقياس الدوران في استخدام أنواع البيانات التي تستكشف منطقة التراكم الداخلية: التحليل الطيفي لخطوط طيف الحديد والتذبذبات شبه الدورية وأحداث الاضطراب الموجي النادرة.[٤٩] ما الحد الأقصى لمعدل الدوران للنجوم المدمجة؟ بالنسبة للنجوم النيوترونية، لا يمكن قياس معدل الدوران إلا للمجموعة الفرعية التي تبعث منها نقطة ساخنة موجات راديوية تجتاح السماء مثل الضوء الكاشف. أما أسرع نجم نابض فيدور بسرعة ٧١٦ دورة في الثانية.[٥٠] وتشير النظريات إلى أن الحد الأقصى هو ١٥٠٠ دورة في الثانية، فإذا زادت عن ذلك سيتمزق النجم النيوتروني. لا يتحدد الحد الأقصى لمعدل دوران الثقب الأسود من خلال بنية المادة، حيث إن جميع المعلومات مخفية داخل أفق الحدث، بل يتحدد من خلال معدل دوران يتحرك فيه محيط أفق الحدث بسرعة الضوء. يدور الثقب الأسود «جي أر إس ١٩١٥ + ١٠٥» (GRS 1915 + 105) - الذي يقع على بُعد ٣٥ ألف سنة ضوئية في كوكبة العقرب - بسرعة مبهرة تبلغ ١٠٠٠ دورة في الثانية الواحدة، وهذا يزيد عن ٨٥٪ من الحد الأقصى. لا يدور الثقب الأسود النموذجي «الدجاجة إكس-١» بهذه السرعة نفسها، ولكن معدل دورانه يبلغ ٧٩٠ دورة في الثانية، وهو يساوي ٩٥٪ من الحد النظري.[٥١]

دعونا نحاول تخيُّل هذه الوحوش الدوارة. تساوي كتلة الثقب الأسود «جي أر إس ١٩١٥ + ١٠٥» ١٤ ضعفًا لكتلة الشمس، ومن ثمَّ فإن نصف قطر شفارتسشيلد بالنسبة له يساوي ٤٢ كيلومترًا. تخيَّل هذا الثقب الأسود يحوم في طبقات الجو العليا فوق لندن. سيكون بقعة مظلمة تغطي عُشر السماء، ولن تلقي بظلالها على لندن وحسب؛ بل على جزء كبير من جنوب إنجلترا. رغم أنها أصغر بـ ٣٠٠ مرة من الأرض، فإنها أثقل بكثير من الشمس. يدور توربين محرك نفاث عسكري بسرعة كبيرة بحيث ينبعث منه صوت أعلى من نغمة C المتوسطة بأوكتافين، وذلك بمصطلحات مغني السوبرانو. لو كان هذا الثقب الأسود مصدرًا ضجة، فستكون على نحو مماثل لهذه النغمة، على الرغم من أن الثقب الأسود في حجم مدينة كبيرة!

على طرف النقيض الآخر، دعنا نفكر في العضو الكبير في نظام الثقبين الأسودين الثنائي في المجرَّة النشطة «أوه جيه ٢٨٧» (OJ 287)، التي تبعد ٣,٥ مليارات سنة ضوئية. تبلغ كتلة هذا الثقب الأسود ١٨ مليار ضعف لكتلة الشمس، ونصف قطر شفارتسشيلد له يبلغ ٥٠ مليار كيلومتر، ويدور بسرعة ١٠٠ ألف كيلومتر في الثانية،

أو ثلث سرعة الضوء، عند خط استوائه.[٥٢] يصعب تصوُّر هذا الموقف، ولكن دعنا نتخيل الثقب الأسود فائق الضخامة يقبع في مكان ما في الفضاء فوق النظام الشمسي. يبلغ حجمه عشرة أضعاف حجم النظام الشمسي، ولكن تبلغ كتلته كتلة مجرَّة صغيرة. يمتلك الثقب الأسود بهذا الحجم معدل دوران أبطأ، لكنه لا يزال قادرًا على الدوران دورة كاملة واحدة كل خمسة أسابيع. للمقارنة، من أجل إظهار مدى غرابة هذا السلوك، فإن جرمًا في النظام الشمسي يتبع قوانين نيوتن ويقع على مسافة من الشمس مثل بُعد أفق حدث هذا الثقب الأسود سيدور دورة واحدة فقط كل ٥٠٠٠ سنة. لا شيء في الكون القريب يؤهلنا لمثل هذه الحركة المتطرفة.

تلسكوب أفق الحدث

«إننا نقترب من الأسوار». يحتسي شيب دوليمان شاي أوراق الكاكاو ليغالب آثار الارتفاع عند قمة بركان يبلغ ارتفاعه ١٥ ألف قدم في جنوب المكسيك. على الرغم من هذه الكلمات المتفائلة، فإن الليلة لا تسير بسلاسة؛ فهو يعاني من مشاكل في الجهاز ولا يفتأ تلسكوبه الراديوي يمتلئ بالثلج. «لو أن هناك شيئًا يرقص بالقرب من حافة الثقب الأسود، فلن يصبح أكثر أهمية من ذلك. نأمل أن نجد شيئًا مذهلًا».[٥٣]

كانت دوليمان طالب فيزياء في كلية ريد في بورتلاند بولاية أوريجون، حيث كان طلاب العلوم يديرون مفاعلًا نوويًّا خاصًّا بهم وكان الهواء في اتحاد الطلاب غالبًا ما يمتزج بدخان الماريجوانا الكثيف. قاده حب السفر والتجوال إلى الانقطاع عامين عن الدراسة قبل الدراسات العليا، وقضاء معظم الوقت في إجراء تجارب علمية في أنتاركتيكا. كطالب دراسات عليا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، جرب دراسة فيزياء البلازما والفيزياء الجيولوجية قبل أن يستقرَّ على علم الفلك الراديوي عندما رأى الخرائط الجميلة لنفاثات الكوازارات التي تنتجها تقنية القياس بالتداخل ذي خط القاعدة الطويل. أدرك دوليمان أن هذه التقنية توفر أفضل فرصة لالتقاط صورة لثقب أسود، وكان يعرف جيدًا المكان الذي يجب أن ينظر إليه؛ ألا وهو المصدر الراديوي المدمج للغاية في اتجاه منطقة «القوس أ*» أو «الرامي أ*» (Sagittarius A*).

إن مركز مجرَّتنا يعد هدفًا منشودًا لهذا البحث، فبصرف النظر عن حقيقة أنه يحتوي على أكثر الأدلة إقناعًا والتي ترشحه لأن يكون ثقبًا أسود، فهو أيضًا الأسهل في

الدراسة؛ فزاوية تموضع أفق الحدث للثقب الأسود في مركز المجرَّة هي ٥٠ ميكروثانية قوسية. هذه زاوية صغيرة، لكن دراستها أسهل بعشر مرات من آفاق الحدث الخاصة بالثقوب السوداء فائقة الضخامة في المجرَّات الخارجية، وأسهل بعدة آلاف من آفاق الحدث لأقرب الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية؛ لذلك أصبح قِبْلَة الفلكيين الراغبين في سبر أغوار ثقب أسود واختبار النسبية العامة بطريقة جديدة.

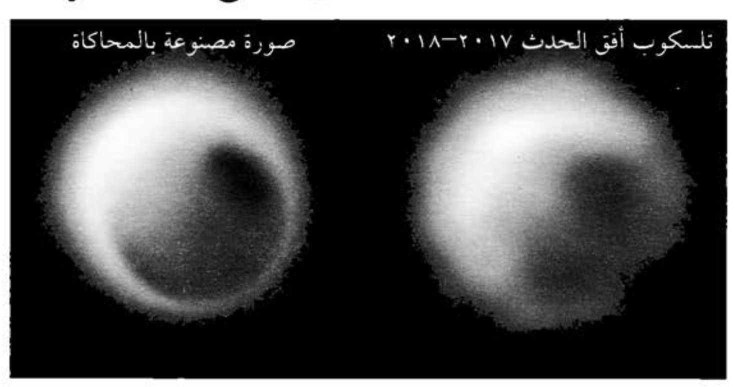
دوليمان هو الرئيس الشاب لمشروع يُدعى «تلسكوب أفق الحدث».[٥٤] لا يتكون هذا التلسكوب من منشأة واحدة، بل هو مصفوفة من ١١ تلسكوبًا راديويًّا منتشرًا في جميع أنحاء العالم. تعمل الأطباق الموجودة في شيلي وأنتاركتيكا وهاواي وأريزونا إلى إسبانيا جميعها بالتنسيق لتقليد حدة تصوير تلسكوب واحد بحجم الأرض. يتطلب تشغيل تلسكوب بحجم العالم ساعات ذرية ذات دقة تبلغ ثانية في القرن. ويعمل علماء فلك من عشرين مؤسسة في هذا المشروع، حيث تُجمع البيانات بأطوال موجية راديوية قصيرة تبلغ ملليمتر أو أقل. تتأثر الموجات الراديوية الملليمترية ببخار الماء في الغلاف الجوي؛ لذلك توجد معظم التلسكوبات في مواقع باردة وجافة. ونتيجة لذلك؛ لا يراقب دوليمان التلسكوبات تمتلئ بالثلوج فحسب، بل عليه أيضًا ارتداء قناع أكسجين لاختبار المعدات على ارتفاع ١٦ ألف قدم في جبال الأنديز، وقد عانى من أشد المخاطر باستخدامه تلسكوبًا في القطب الجنوبي.

تدير مجموعة من ثلاثين عالمًا ومهندسًا الطبقَ الراديوي الموجود على قمة كت في جنوب ولاية أريزونا، والذي يعد جزءًا حيويًّا من المصفوفة. ويستخدم زملاؤنا في جامعة أريزونا، فريال أوزيل وديميتريوس بسالتيس، النسبية الرقمية وتتبع الأشعة على حاسوب عملاق قوي لحساب شكل الثقب الأسود. ويمضي زميل آخر، دان مارون، الشتاء كل عام في أنتاركتيكا للتحكُّم في هوائي آخر في المجموعة، وهو تلسكوب القطب الجنوبي. هؤلاء العلماء في الأربعينيات، وهم جزء من جيل مصمم على الوصول إلى قاع الثقوب السوداء، على الأقل مجازيًّا.

عند البحث عن مواقع رصد أعلى وأكثر جفافًا، لا يمكن التغلب على القطب الجنوبي؛ حيث ترتفع قبة الجليد إلى ارتفاع ٨٥٠٠ قدم فوق مستوى سطح البحر، وتكون الرطوبة أقل من ١٠٪. وتتحول كل هذه المياه إلى ثلج صلب مثل الجرانيت. آمل أن أذهب إلى هناك في يوم من الأيام، لكن أعتقد أنني سأتخلى عن تلك الليلة الشتوية الطويلة، التي تعوي فيها العاصفة وتتأرجح درجة الحرارة عند نحو

سالب ٦٠ درجة مئوية. لو كنت ستقضي فصل الشتاء في القطب الجنوبي، عليك أن تكون متأكدًا تمامًا من صحتك العقلية وصحة زملائك. وبما أنه عالم فلك راديوي، فإن دان مارون لا يحتاج إلى سماء مظلمة لرصد الموجات الملليمترية؛ لذلك يذهب خلال فصل الصيف في أنتاركتيكا، مستبدلًا بشتاء توسان الدافئ درجات حرارة أقل من درجة التجمد بقليل، والتي تكون دافئة بقدر كونها في قاع العالم. ثمة شيء شاعري بشأن الذهاب إلى مكان دائم الإضاءة لالتقاط صورة لظلمة دائمة.

حقق المشروع بالفعل بعض النتائج المثيرة للإعجاب، مع أن المصفوفة لا تعمل بكامل طاقتها حتى الآن. تتساقط المادة في مركز المجرَّة ولا بد أن تكون هذه المنطقة ساطعة للغاية، نظرًا للحجم المقاس بواسطة تلسكوب أفق الحدث. ومع ذلك فإنها منطقة خافتة؛ لذا لا بد أن الطاقة تختفي في أفق الحدث، وهو ما يعد دليلًا قويًّا على وجود ثقب أسود.[٥٥] تُظهِر البيانات الأولى أن القرص المزود يُرى بالقرب من الحافة، ممَّا يعني أن منظورنا يسمح بقياس دوران القرص، وبالتالي يضع قيودًا على دوران الثقب الأسود. ويرتبط تباين المصدر الراديوي المدمج بالتغيرات في تدفق المادة



شكل ٥١: على اليسار توجد صورة مصنوعة بأجهزة المحاكاة للثقب الأسود الموجود في مركز مجرَّتنا. تستخدم المحاكاة طريقة تدفق المادة المتراكمة وتُظهر ضوءًا ملتفًا حول الثقب الأسود في حلقة مميزة تحيط بظل الثقب الأسود. يبلغ قطر الحلقة ٥ أضعاف نصف قطر شفارتسشيلد. وتكون الصورة ساطعة على الجانب القريب وخافتة على الجانب البعيد من القرص المزود. أما على اليمين فتوجد صورة للأداء المتوقع من تلسكوب أفق الحدث في عام ٢٠١٨.

«إيه برودريك، في فيش/معهد بريمتر وجامعة واترلو/المجلة الفيزيائية الفلكية، المجلد ٧٩٥، منسوخة بإذن/حقوق الطبع والنشر الجمعية الفلكية الأمريكية»

المتراكمة بالقرب من الثقب الأسود. وتشير المحاكاة إلى أن المصفوفة ستكون قريبًا حساسة بما يكفي لتحقيق هدفها المصممة من أجله، ألا وهو إنشاء أول صورة لثقب أسود (شكل ٥١).

ستكون هذه الصورة - إذا أمكن الحصول عليها — عبارة عن دائرة صغيرة مظلمة من لا شيء. تقول النسبية العامة إن الظل سيكون بقطر ٥٠ مليون ميل، والتي عند رؤيتها من الأرض، ستشبه حجم بذرة خشخاش في نيويورك عند رؤيتها من لوس أنجلوس. سيتضاعف حجم الصورة الظِليَّة من خلال الانحناء الثقالي للضوء، وستحاط بضوء من النجوم المحيطة. ولو لم تكن الصورة دائرية تمامًا، فسيكون ذلك دليلًا ضد نظرية «اللاشعر» الخاصة بالثقوب السوداء.[٥٦] ولكن إذا كانت الصورة بالشكل والحجم اللذين تنبأت بهما النسبية، فستكون أفضل دليل مرئي حتى الآن على أن الزمان والمكان يمكن أن ينحنيا في صورة كرة، وأنه يمكن أن تختفي ٤ ملايين شمس دون أثر يُذكر.



الفصل السابع

الرؤية بعيني الجاذبية

ثمة ثورة تلوح في الأفق. إننا على وشك أن نكون قادرين على «رؤية» الثقوب السوداء النشطة. منذ ٤٠٠ عام، استكشف الفلكيون الكون باستخدام الضوء والأشكال الأخرى من الإشعاع الكهرومغناطيسي وحسب، حيث كانوا يقيسون خصائص «مادة» الكون من خلال طرق انبعاث الإشعاع منها وتفاعله معها. ثم في عام ٢٠١٥، رُصدت موجات الجاذبية لأول مرة.

وموجات الجاذبية هي تموجات في الزمان والمكان تنتقل بسرعة الضوء، كما أنها تمثل نافذة فريدة من نوعها مفتوحة على الجاذبية الشديدة للثقوب السوداء والنجوم النيوترونية والمستعرات العظمى، وستسمح لعلماء الفلك باختبار النسبية العامة بطرق جديدة. تصل موجات الجاذبية لنا من مسافات بعيدة ويمكن استخدامها لاستكشاف ما جرى في الكون بعد الانفجار العظيم مباشرة. إن الرؤية بعيني الجاذبية تُبشِّر بتغيير فهمنا للثقوب السوداء.

طريقة جديدة لرؤية الكون

لقد وقعت ثورتان رئيستان في طريقة رؤيتنا للكون، بدأت الأولى عام ١٦١٠، عندما أخذ جاليليو جهازًا تم اختراعه حديثًا يسمى التلسكوب ووجَّهه نحو سماء الليل. كان أفضل تلسكوب لديه يتضمن عدسات ذات قطر يبلغ طوله نصف بوصة، ويجمع ضوءًا أكثر ممَّا تجمعه العين بمائة مرة. ومنذ عصر جاليليو عمل علماء الفلك على تحسين نظارته المقربة البسيطة. ومنذ مائة عام، بدأوا في استخدام المرايا بدلًا من العدسات لتجميع الضوء؛ لأن العدسات تضعف عندما تكون كبيرة ولا تجمع جميع الألوان في نقطة التركيز في الموقع نفسه. وفي العصر الحديث بنى علماء الفلك تلسكوبات بصرية يبلغ قطرها ١٠ أمتار، إما باستخدام مرايا أحادية متراصة أو مجموعة

من القطاعات السداسية الأصغر.[١] وتضاعفت قوة جمع الضوء في أربعة قرون خلت على زمن جاليليو بمعامل مليون.

وفي الوقت نفسه حدث تقدم إضافي في العمق من خلال تحسين طريقة رصد الضوء. فالعين راصد كيميائي غير فعَّال، فلمنحِنا وهمَ الحركة المستمرة، يجب أن تنقل المعلومات التي تقع على شبكية العين إلى الدماغ عشر مرات في الثانية. وهذا يعني أنها تجمع الضوء فقط أو «تدمجه» لعُشر ثانية. ابتُكر التصوير الفوتوغرافي في منتصف القرن التاسع عشر، وبعد ذلك بقليل استخدمه علماء الفلك لالتقاط صور لسماء الليل. يُلتقط الضوء كيميائيًّا بعملية ليست أكثر كفاءة من العين، لكن أوقات التعرُّض الطويلة تعطي عمقًا أكبر بكثير. لكن التقدم الحقيقي حدث في ثمانينيات القرن العشرين، عندما تم تحسين التصوير الرقمي. تتمتع الأداة ذات الشحنة المزدوجة (CCD) الآن بكفاءة تتراوح بين ٨٠٪ و٩٠٪ في تحويل الفوتونات الواردة إلى إلكترونات، ثم إلى إشارة كهربائية يمكن تحويلها رقميًّا بسهولة، وتمثل الأدوات ذات الشحنة المزدوجة أدوات رصد شبه مثالية؛ فكفاءة رصد الضوء فيها تتفوق على العين بمعامل يبلغ مائة ألف.

إن الجمع بين هذين التحسينين يعني أن أفضل التلسكوبات ترى بعمق أكبر من العين بمعامل مائة مليار، وهذا يشبه الفرق بين مقيم بنصف الكرة الشمالي الذي يرى مجرَّة خارجية واحدة – ميسييه ٣١ (M31) – وتلسكوب كبير يرى ١٠٠ مليار مجرَّة. والفرق بين رؤية النجوم على بُعد بضع مئات من السنين الضوئية ورؤية الضوء الذي كان يسافر لمدة ١٣ مليار سنة. لقد تحسَّنت الأداة ذات الشحنة المزدوجة كثيرًا لدرجة أن عدد الفوتونات المُسجَّلة بواسطة التلسكوبات الكبيرة في العام الماضي يتجاوز عدد الفوتونات التي سجلتها كل العيون البشرية في التاريخ.

أما عن الثورة الثانية في مجال رؤية الكون فقد تشكلت ملامحها على مدى النصف الأول من القرن العشرين، منذ أن كان أجدادنا الأوائل في إقليم السافانا بإفريقيا يحدقون في السماء، استخدم علم الفلك شريحة صغيرة من الطيف الكهرومغناطيسي، فمن أكثر درجات الأزرق زرقة إلى أكثر درجات الأحمر حمرة يمثل هذا فقط معاملًا يبلغ ٢ في الطول الموجي أو التردد. والتلسكوبات الأكبر ببساطة تحفر على نحو أعمق في الشريحة الضيقة نفسها من الطيف.

تم تطوير تقنيات لفتح الطيف الكهرومغناطيسي من أجل علم الفلك. إن مشاهدة الكون في الضوء المرئي محدودة مثل الرؤية بالأبيض والأسود، مقارنةً بالرؤية بألوان

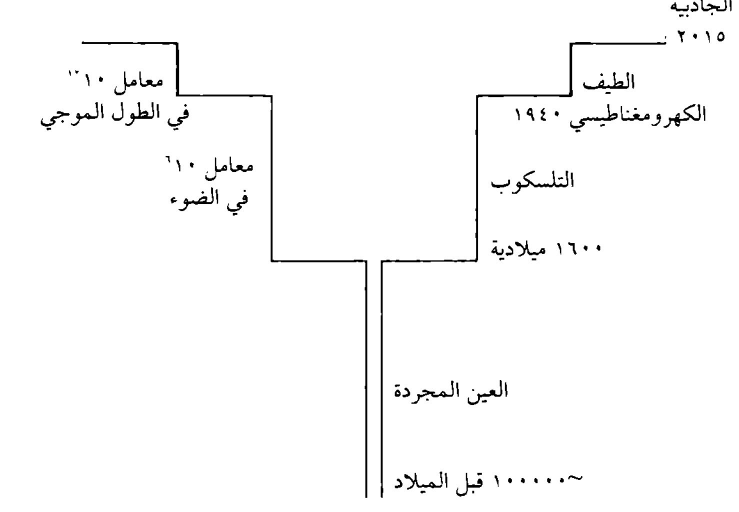
زاهية. لكن ربما وجدنا تشبيهًا أفضل من عالم الموسيقى، فالضوء المرئي يمثل مفتاحين متجاورين على البيانو، بينما يمثل الطيف الكهرومغناطيسي من الموجات الراديوية إلى أشعة جاما مجموعة المفاتيح الكاملة المكونة من ٨٨ مفتاحًا. كانت أول موجات غير مرئية تُستَخدم في علم الفلك هي الموجات الراديوية؛ ففي نهاية القرن التاسع عشر أظهر جوليلمو ماركوني أنه يمكن إرسال الموجات الراديوية ورصدها عبر مسافات كبيرة، وكما رأينا، في غضون ثلاثين عامًا، استخدم كارل جانسكي هوائيًّا بسيطًا لرصد الموجات الراديوية المنبعثة من مركز مجرَّتنا. وفي عشرينيات القرن الماضي، استخدم اثنان من علماء الفلك في مرصد جبل ويلسون جهازًا يحول الفرق في درجة الحرارة إلى إشارة كهربائية لرصد الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من عدد من النجوم الساطعة، ولكن علم فلك الأشعة تحت الحمراء لم ينهض إلى أن ابتُكِرَت أجهزة كشف أكثر حساسية في سبعينيات القرن العشرين. كانت عمليات الرصد عند الأطوال الموجية القصيرة غير المرئية مستحيلة حتى تمكَّن الفلكيون من تجنُّب امتصاص الإشعاع بواسطة الغلاف الجوي للأرض. ورُصدت الأشعة السينية المنبعثة من الشمس بواسطة صاروخ سبر في عام ١٩٤٩، ثم رُصد الثقب الأسود النموذجي «الدجاجة إكس-١» لأول مرة بعد خمسة عشر عامًا. تقدم علم فلك الأشعة السينية بسرعة، مع إطلاق سلسلة من الأقمار الصناعية في سبعينيات القرن العشرين. وقد تم التنبؤ بأشعة جاما الكونية قبل سنوات من رصدها بواسطة الأقمار الصناعية في تسعينيات القرن العشرين.[٢]

تمنح هذه القدرات علماء الفلك أدواتٍ لرصد الإشعاع بأطوال موجية تتراوح بين واحد على ألف من حجم البروتون وصولًا إلى ١٠ أمتار (ترددات تتدرج من $١٠^{٨}$ إلى $١٠^{٢٧}$ هرتز). إن الانتقال من التقاط الطول الموجي بعامل ٢ إلى عامل ١٠ مليارات مليار يشهد على قدرة التكنولوجيا على تغيير نظرتنا للكون. فلا يمكن رصد سوى عدد قليل من المصادر عند جميع الأطوال الموجية عبر الطيف الكهرومغناطيسي، وجميعها مجرَّات نشطة تحركها ثقوب سوداء فائقة الضخامة.[٣]

إن كل ما نعرفه عن الكون يرتبط بتلسكوبات تجمع الإشعاع، من السهل جدًّا نسيان أننا نعتمد على معلومات غير مباشرة، الكون مليء بالمواد: حبيبات الغبار وسحب الغاز والأقمار والكواكب والنجوم والمجرَّات، ونحن لا نرى هذه المواد مباشرة؛ بل نستنتج خصائصها من خلال طريقة تفاعلها مع الإشعاع الكهرومغناطيسي، تتحدد العناصر الكيميائية عن طريق خطوط الطيف الخاصة التي تنبعث منها أو تمتصها. تكشف

حبيبات الغبار نفسها عن طريق امتصاص الضوء وإصدار الأشعة تحت الحمراء. وتُرى الأقمار والكواكب من خلال ضوء النجوم المنعكس. وتُرى النجوم من خلال الإشعاع الذي يتسرب منها كناتج ثانوي للاندماج النووي. وتُرسم خرائط المجرَّات باستخدام تأثير دوبلر لخطوط الطيف الناتجة من الغاز والنجوم الموجودة فيها.

لكن كل هذا غير مباشر، ويتعلق فقط بنسبة ٥٪ من الكون الذي يتكون من مادة عادية، أما نسبة ٩٥٪ التي تتكون من المادة المظلمة والطاقة المظلمة، فلا تزال غير مرئية بالنسبة لنا؛ لأنها لا تتفاعل مع الإشعاع. الأجرام الفلكية هي الممثلون، ولكن «مسرح» هذه الدراما الكونية غير مرئي أيضًا. يتتبع علماء الفلك توسع الكون باستخدام المجرَّات كعلامات على الزمكان غير المرئي.



شكل ٥٢: لقد قامت ثلاث ثورات فقط في مجال الطريقة التي نرى بها الكون. فعلى مدى معظم تاريخ البشرية، اقتصرنا على علم الفلك الذي يستخدم العين المجردة. وفي عام ١٦١٠، استخدم جاليليو التلسكوب وسيلة لجمع المزيد من الضوء، وخلال أربعة قرون وصلت التلسكوبات إلى قطر يزيد عن ١٠ أمتار. وفي الجزء الأول من القرن العشرين، فتحت سلسلة من التطورات التكنولوجية، التي شملت أجهزة الرصد والتلسكوبات الجديدة في الفضاء المجالَ لاستخدام الطيف الكهرومغناطيسي في الفلك والتحول من استخدام الموجات الراديوية إلى أشعة جاما. وفي عام ٢٠١٥، سمح لنا رصد موجات الجاذبية برؤية الكون بعيني الجاذبية لأول مرة.

«كريس إمبي»

كذلك فإن رصد الثقوب السوداء أيضًا غير مباشر؛ فأقرب ما نحصل عليه هو معلومات من الإشعاع عالي الطاقة في الإكليل المحيط الذي ينعكس عن الجزء الداخلي من القرص المزود، ثم يمكن تحديد كتلة الثقب الأسود ودورانه من خلال خطوط طيف الأشعة السينية.

ألن يكون من الجميل رؤية «مكونات» الكون دون وسيط الإشعاع الكهرومغناطيسي؟ ألن يكون أمرًا رائعًا أن نشاهد انحناء الزمكان بشكل مباشر؟ يمكننا ذلك، فقط إذا كان لدينا «عينا الجاذبية» (شكل ٥٢). وأفضل تشبيه لهذا الأمر من عالم البشر هو التخاطر، فالمخ عبارة عن كتلة من الأنسجة الحية تزن نحو ثلاثة أرطال. بمزيد من التفصيل نقول إنه شبكة كهروكيميائية تتكون من مليارات الخلايا العصبية وتريليونات الروابط بينها. لكن هذه المعرفة لم تنبئنا بمخزن الذكريات أو العواطف أو الأفكار الآنية أو إحساسنا بالذات. إن رؤية الكون من خلال الجاذبية هي كرؤية مشاعر الآخرين وأفكارهم وقت أن تدور بخلدهم.[٤]

تموجات في الزمكان

ما هذه التموجات التي تحدث في الزمكان؟ تذكَّر أنه في النسبية العامة تتحكم المادة في انحناء الزمكان. تحدث موجات الجاذبية في أي وقت تغير فيه الكتلة حركتها أو تكوينها.[٥] موجات من الفضاء المشوَّه تشع خارج المصدر بالطريقة التي تتحرك بها الموجات بعيدًا عن حجر ألقي في البركة. نظريًّا، تتحرك الموجات بسرعة الضوء وتضعف مع بُعد المسافة عن المصدر. وهذا التشوُّه الحادث للفضاء ضئيل للغاية بالنسبة إلى معظم المادة المتحركة. وتصدر أقوى موجات الجاذبية من الأحداث الكونية الأكثر دراماتيكية: الثقوب السوداء التي تدور حول بعضها وتتصادم، والنجوم النيوترونية التي تدور حول بعضها بعضًا وتتصادم، وانفجارات المستعرات العظمى، والولادة العنيفة للكون نفسه.

تخيل زمكانًا مسطحًا تمامًا يتضمن حلقة دائرية من الجزيئات على سطح مستوي. أتخيل الأمر كسطح شاشة الكمبيوتر الخاص بي. الهدف من الجسيمات هو فقط جعل الزمكان غير المرئي مرئيًّا. إذا مرت موجة جاذبية مباشرة داخل الشاشة أو خارجها، فسوف تتبع حلقة الجسيمات التشوُّه في الزمكان، حيث تتحرك بالتناوب على نحو

بسيط في اتجاه عمودي ثم أفقي، مع تكرار التشوُّه دوريًّا (شكل ٥٣).[٦] وكما يحدث مع الموجات الأخرى، توصف موجات الجاذبية من خلال المدى، والتردد، والطول الموجي، والسرعة. المدى هو الجزء البسيط الذي تتشوَّه به حلقة الجسيمات مع مرور الموجة، والتردد هو عدد المرات التي تتمدد بها حلقة الجسيمات أو تتقلص في الثانية، والطول الموجي هو المسافة على طول الموجة بين نقطتين عند الحد الأقصى للامتداد أو التقلص. تنتقل هذه الموجات بسرعة الضوء عبر الكون، وتحني الأشياء المادية ولكنها تمر أيضًا منها كما لو أنها ليست موجودة.[٧]

في هذا التشبيه، نتخيَّل دائرة تتسطح وتتمدد إلى قطع ناقص. لكن هذا يبالغ في التشوُّه الفعلي الناتج عن موجة الجاذبية العادية، إذ تتشوَّه حلقة الجسيمات التخيلية عن شكل الدائرة بمقدار ١٠$^{-٢١}$، أو جزء واحد في ١٠٠٠ مليار مليار جزء! إن اكتشاف وميض الزمكان البالغ هذه الكمية الضئيلة يبدو كتجربة مستحيلة.

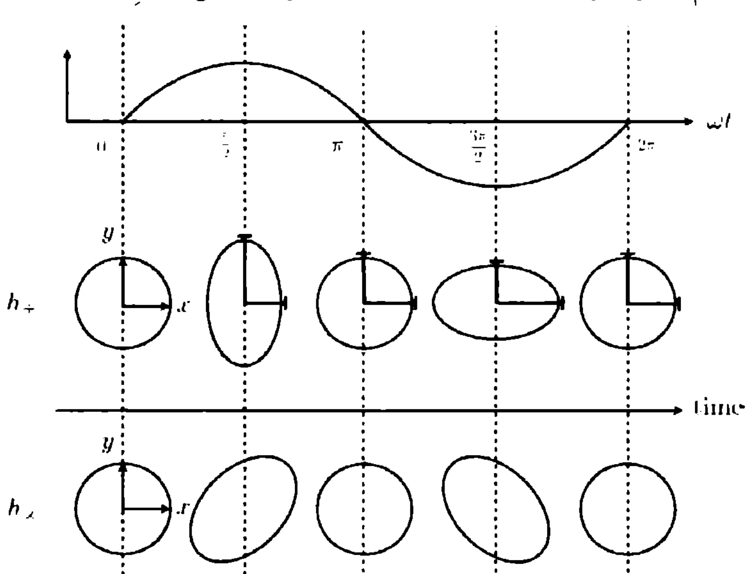
لكن كان صاحب تلك النظرية التي تنبأت بموجات الجاذبية منكرًا لتلك الموجات في البداية، لقد رأينا أن أينشتاين لم يكن يؤمن بوجود الثقوب السوداء كما قلل من أهمية التعديس الثقالي. وفي عام ١٩١٦، وبناءً على اقتراح من زميله هنري بوانكاريه، أجرى قياسًا شبيهًا باستخدام الكهرومغناطيسية. عند تحريك الشحنة الكهربائية ذهابًا وإيابًا، ينتج عن الاضطراب المتذبذب موجة كهرومغناطيسية تشبه الضوء. عرف أينشتاين أن المادة تحني المكان؛ لذلك كان من المنطقي أن تؤدي هذه المادة أثناء حركتها إلى حدوث اضطراب متذبذب في المكان.

لقد واجه أينشتاين مشاكل رهيبة لأجل إنجاح هذه الفكرة، لكن هذا القياس معيب؛ لأن الشحنات الكهربائية يمكن أن تكون موجبة وسالبة، بينما في الجاذبية لا يوجد شيء اسمه كتلة سالبة. وعانى أينشتاين بشدة مع أنظمة الإحداثيات والتقريبات لإجراء الحسابات اللازمة. واشتق ثلاثة أنواع من الموجات، ثم شعر بالخزي عندما أوضح آرثر إدنجتون أن اثنين من هذه الموجات مصطنعة رياضيًّا بحيث يمكن أن تتحرك بأي سرعة. حتى إن إدنجتون قال مازحًا إنها يمكن أن «تتوالد بسرعة الأفكار».[٨]

بحلول عام ١٩٣٦، كان أينشتاين قد اتخذ قراره؛ ففي كل مرة حاول فيها كتابة صيغة لموجات السطح، كما هو الحال مع شاشة الكمبيوتر الخاصة بنا، واجه حدثًا متفردة حيث تنهار المعادلات وتصبح الكميات لا نهائية. فألَّف ورقة بحثية بالاشتراك مع ناثان روزِن، الذي كان طالبًا لديه في جامعة برنستون، بعنوان «هل موجات الجاذبية

موجودة؟» وكانت الإجابة التي قدمها البحث لهذا السؤال «لا» قاطعة، ثم قدَّمها إلى المجلة المرموقة «فيزيكال ريفيو» وكان مذهولًا عندما رفضها حَكم مجهول، مشيرًا إلى العديد من الأخطاء فيها. لم تخضع أبحاث أينشتاين أبدًا لمراجعة النظراء من قبل، وكانت أبحاثه في ألمانيا تُنشر دائمًا تلقائيًا. فكتب خطابًا غاضبًا إلى المحرر يقول فيه: «أرسلنا نحن (السيد/ روزِن وأنا) ورقتنا البحثية للنشر ولم نأذن لك بعرضها على متخصصين قبل نشرها. لا أرى أي سبب للرد على تعليقات هؤلاء الخبراء المجهولين، الخاطئة على أي حال».[٩]

لكن أينشتاين كان مخطئًا، وكان زميل شاب آخر قد أشار لهذا الخطأ، ومن المفارقات أن ذلك كان قبل يوم من الموعد المقرر لإلقاء محاضرته في برنستون بعنوان «عدم وجود موجات الجاذبية»، وبعد أن نشر أينشتاين وروزِن بحثهما المصَحَّح



شكل ٥٣: موجات الجاذبية هي تذبذبات جيبية للزمكان، كما هو مُوضَّح في الجزء العلوي كدورة كاملة واحدة من تباين المدى. ويظهر استقطابان مستقلان لموجات الجاذبية في الجزأين السفليين، يخضعان لإزاحة بمقدار ٤٥ درجة، وليس ٩٠ درجة كالموجات الكهرومغناطيسية. تتحرك الموجة عموديًا على الصفحة في هذا المثال. ويُظهر الجزء الأوسط ذراعي مقياس التداخل المضافة لتوضيح كيفية رصد هذه الموجات. لكن هذا التشوُّه الظاهر في هذه المخططات مبالغ فيه للغاية؛ ففي الواقع، سيكون تشوُّه الدوائر غير محسوس.

«إس ميرشكاري/جامعة واشنطن، سانت لويس، مُصرَّح بنشرها»

في مجلة أخرى، ظل الفيزيائيون منقسمين.[10] اعتقد الكثيرون أن موجات الجاذبية كانت بنية رياضية دون معنى فيزيائي، ولكن بعد كل شكوكه الأولية، أصبح أينشتاين مقتنعًا بأنها حقيقية؛ فقد أقنعه النجاح التدريجي لنظريته بأن يثق في توقعاتها.

مليونير غريب الأطوار ومهندس منعزل

بدا رصد تموجات الزمكان صعبًا للغاية لدرجة أن الفيزيائيين تجاهلوها. وظلت حبيسة درج الفيزياء المغلق لمدة عشرين عامًا بعد نشر بحث أينشتاين وروزن، حتى لفتت انتباه مليونير أمريكي غريب الأطوار يُدعى روجر دبليو بابسون. لو لم تفكر مطلقًا في أن الفيزياء يمكن أن تجعلك غنيًّا، فانتبه لهذه القصة.

بدأ اهتمام بابسون بالجاذبية بمأساة عائلية؛ فقد غرقت شقيقته الكبرى بينما كان لا يزال رضيعًا، وقال في وقت لاحق إن السبب في ذلك هو أنها لم تستطع مقاومة الجاذبية. وفي حياته المهنية، طبَّق نسخة من قوانين نيوتن على سوق الأوراق المالية، حيث كان يقول: «ما يرتفع لأعلى لا بد أن يهبط»، و«لكل فعل رد فعل».[11] وتوقع انهيار وول ستريت عام ١٩٢٩، وتمكَّن من شراء أسهم رخيصة في طريقها للصعود وبيعها قبل أن تتراجع أسعارها.[12] وقال بابسون إنه مدين للجاذبية لمساعدته في أن يصبح مليونيرًا.

في عام ١٩٤٩ أنشأ بابسون مؤسسة «أبحاث الجاذبية» (Gravity Research Foundation)، ورعى مسابقة مقال رفيعة المستوى حول طرق مواجهة الجاذبية أو إبطال تأثيرها. وغنيٌّ عن القول إن بعض المقالات التي تفتقر إلى الدقة قد فازت بهذه المسابقة. تحدثت المواد الترويجية للمؤسسة عن التحكم في الجاذبية من منظور مشي يسوع على الماء.[13] لذلك فقد تجنبها علماء الفيزياء المشهورون، ووصفها واحد من أبرز المساهمين في تبسيط العلوم، العالم الشهير مارتن جاردنر، بأنها «ربما تكون أكبر مشروع غير ذي جدوى في القرن العشرين».[14]

وفي محاولة لاستعادة المصداقية لدى مجتمع الفيزياء، أسس بابسون معهدًا كان هدفه الوحيد هو تمويل أبحاث خالصة عن الجاذبية. وطلب من جون ويلر – عالم الفيزياء في جامعة برنستون، والذي ابتكر مصطلح «الثقب الأسود» – إقناع زميله برايس ديويت بتقلُّد رئاسة المعهد الجديد. نظم ديويت مؤتمرًا تاريخيًّا حول الجاذبية والنسبية العامة في جامعة نورث كارولينا في أوائل عام ١٩٥٧.

بعث المؤتمر الحماس في جيل شاب من مُنظِّري الجاذبية.[١٥] تركز النقاش حول ما إذا كانت موجات الجاذبية تحمل الطاقة أم لا. أقنعت «حجة الخرزة اللاصقة» لريتشارد فاينمان معظم الحضور. إذ طلب منهم تخيُّل حلقتين منفصلتين من الخرز ملفوفتين تمامًا حول قضيب معدني. وعندما تمر موجة جاذبية عبر القضيب، تتسبب قوتها في انزلاق الحلقتين للأمام والخلف قليلًا. ويعني الاحتكاك بين الحلقتين والقضيب أن القضيب سوف يسخن، ومن ثمَّ فإن الطاقة تنتقل من الموجة إلى القضيب. كان من بين الحضور مهندس شاب يُدعى جوزيف ويبر، وقد جذب هذا الحديث شديد انتباهه.

وُلِد ويبر في أسرة فقيرة من المهاجرين الليتوانيين، وقد خُفف اسمه لتيسير نطقه. ترك ويبر الجامعة وانضم إلى البحرية لتوفير المال لوالديه، حيث ارتقى إلى رتبة ملازم أول. وخلال الحرب العالمية الثانية ترأس العمليات الإلكترونية المضادة في البحرية، وبعد الحرب التحق بكلية الهندسة بجامعة ماريلاند. كانت الحياة العلمية لويبر عبارة عن سلسلة من الفرص الضائعة، فقد كان من الممكن أن يمنحه جورج جاموف مشروع الدكتوراه الخاص في مجال اكتشاف موجات الميكروويف المنبعثة من الانفجار العظيم، لكنه لم يفعل، ومُنحت جائزة نوبل عن هذا الاكتشاف الذي تم بمحض الصدفة، لاحقًا لكلٍّ من أرنو بينزياس وروبرت ويلسون. وفي عام ١٩٥١ قدَّم ويبر الورقة البحثية الأولى حول فكرة الميزر والليزر، لكن تشارلز تاونز هو الذي أصبح رائدًا في مجال هذه الابتكارات التكنولوجية بعد أن قرأ ورقته البحثية. لكن أكبر فرص ويبر الضائعة إيلامًا كانت موجات الجاذبية.[١٦]

لقد ألهم هذا المؤتمر الذي عُقد في تشابل هيل ويبر، فتساءل حول كيفية اكتشاف موجات الجاذبية. توصل ويبر إلى فكرة وضع أسطوانة معدنية مُعلَّقة على أسلاك في غرفة تفريغ لعزلها عن البيئة المحيطة. كان طول الأسطوانة مترًا ونصف، وقطرها ثلثي متر، ووزنها ثلاثة أطنان مترية، وكانت محاطة بأجهزة استشعار كهروضغطية لتحويل الاهتزازات الميكانيكية إلى إشارات كهربائية.[١٧] كان ويبر يأمل أنه إذا مرت موجة جاذبية عبر الأسطوانة أن ترنَّ تمامًا مثل الجرس الذي يُطرق بمطرقة (شكل ٥٤).

وضع ويبر إحدى «أسطواناته» في غرفة بجامعة ماريلاند وواحدة مماثلة لها على بُعد ٦٠٠ ميل في مختبر أرجون الوطني خارج شيكاغو. وكان رابط البيانات بينهما خط هاتف عالي السرعة. كان السبب في استخدام أداتي راصد متطابقتين هو استبعاد الضوضاء المحلية الناجمة عن العواصف الرعدية والزلازل الخفيفة ووابل الأشعة

الكونية والخلل الحادث في الطاقة وأي شيء آخر قد يحرك الأسطوانة. إذا لم يتم تسجيل إشارة في الوقت نفسه في كلا الموقعين، فستُهمل باعتبارها زائفة. وبصرف النظر عمَّا يحدث في البيئة المحيطة بالأداتين، كان الضجيج المستمر في تجربة ويبر ناجمًا عن الحركة الحرارية للذرات في أسطوانة الألومنيوم. وتسبب هذا التحريض الحتمي في تغير طول الأسطوانة بشكل عشوائي بما يبلغ نحو $١٠^{-١٦}$ مترًا أو أقل من حجم البروتون.

ظن ويبر أنه وجد ما يرنو له عندما رأى إشارات كانت أعلى بكثير من مستوى هذا الضجيج الحراري. في عام ١٩٦٩ أعلن رصد موجات الجاذبية وصرَّح بذلك في أحد اجتماعات الجاذبية والنسبية الرئيسية. وبعد عام ادعى أن العديد من موجات الجاذبية نشأ من مركز مجرَّة درب التبانة.[١٨] فوجئ الفيزيائيون جميعًا وذهل الكثير منهم. لكن



شكل ٥٤: جوزيف ويبر وأداة رصد موجات الجاذبية الرائدة، والتي وُضعت في مختبر فيزياء في جامعة ماريلاند. ووُضعت أداة رصد مماثلة على بُعد ٦٠٠ ميل، وينبغي أن تُسجَّل الإشارة الحقيقية في كلا أداتي الرصد. وكما فعل جروت ربير قبله، ظل ويبر لبعض الوقت الشخص الوحيد الذي يُجري تجارب في هذا المجال الجديد للفيزياء الفلكية. وأعلن عن اكتشاف موجات الجاذبية في عام ١٩٦٩، ولكن لم يستطع أحد أن يكرر نتائجه، ومن ثمَّ تعرَّض للتشكيك.

«في. تريمبل، مُصرَّح بنشرها»

معظمهم كان سعيدًا بتأكيد التنبؤ الرئيسي للنسبية العامة. تم الاحتفاء بويبر، وظهرت صورته على أغلفة المجلات؛ لقد أصبح مشهورًا.

ثم بدأ كل شيء يتكشف، تشير إشارة ويبر المنبعثة من مركز درب التبانة إلى أنه يتم تحويل ١٠٠٠ كتلة شمسية سنويًّا إلى طاقة موجات جاذبية. وأشار المنظِّر الشاب مارتن ريس إلى أن فقدان هذه الكتلة حسابيًّا من شأنه أن يتسبب في «تفكك» المجرَّة ثم انهيارها. وحاول آخرون تكرار نتائج ويبر. ظهرت أسطوانات ويبر في جميع أنحاء الولايات المتحدة وألمانيا وإيطاليا وروسيا واليابان، ووضع رون دريفر - الذي سنلتقي به لاحقًا - العديد منها في جلاسكو؛ حتى إنه توجد واحدة من أسطوانات ويبر على سطح القمر، تركها هناك رواد فضاء مهمة أبولو في عام ١٩٧٢. وبحلول منتصف سبعينيات القرن العشرين، كانت عدة مجموعات قد حسَّنت من تصميم وحساسية أسطوانات ويبر الأصلية، وكان هذا يتم غالبًا بتبريد أجهزة الرصد لتقليل الضوضاء الحراريه.

لكن لم يرصد أحدهم أي شيء، وشكَّك فيزيائيون آخرون في تقنية ويبر التجريبية، فقد بدا أنه أخطأ في تقدير إحصائيات الأحداث المتزامنة في أجهز رصده المنفصلة على نطاق واسع. فادعى حدوث ذروة في بياناته كل أربع وعشرين ساعة، عندما يمر مركز المجرَّة في سماء المنطقة. وسريعًا أشير إلى أن موجات الجاذبية لا بد أن تمر عبر الأرض بسلاسة بالغة كالسكين في الزبد، ومن ثمَّ كان لا بد أن يرى ذروة كل اثنتي عشرة ساعة. وفي عام ١٩٧٤ في المؤتمر الرئيسي السابع للجاذبية والنسبية، أدان رئيس علماء الفيزياء في آي بي إم، ريتشارد جاروين، ويبر وبياناته.

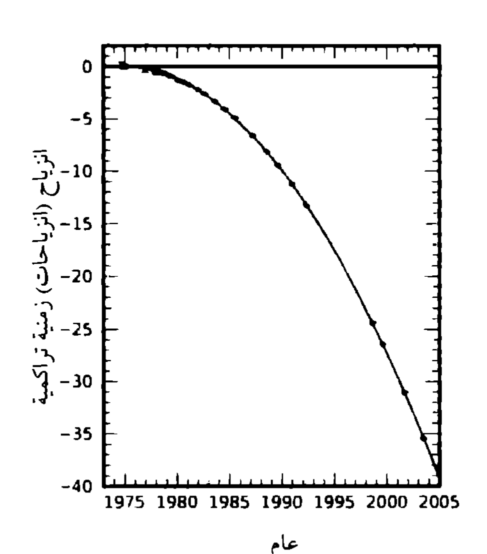
وسريعًا ما اتفق معه بقية مجتمع الفيزياء، فلقد كان ويبر مذنبًا بشأن التقنية التجريبية الرديئة والأسوأ من ذلك، تحيزه في عرض البيانات. وعلى الرغم من ذلك، لم يتزعزع أبدًا إيمانه بأنه رأى تموجات الزمكان. وبحلول نهاية حياته المهنية، كان شخصية ساخطة ومنعزلة إلى حد كبير.[١٩]

لكن عمل ويبر قد حفَّز على الابتكار، حيث تحمَّس علماء فيزياء آخرون لاكتشاف هذا التنبؤ المهم للنسبية العامة. فقد كتب جون ويلر يقول:

> «بعد عملنا معًا في ليدن، انغمس هو في موجات الجاذبية بحماس كما لو كانت عقيدته، وتابع دراستها لبقية حياته المهنية. أحيانًا أسأل نفسي عمَّا إذا

كنت قد صببت في ويبر حماسًا كبيرًا حيال هذه المهمة الضخمة الصعبة. وسواء كان، على أي حال، أول مَن اكتشف موجات الجاذبية أو ما إذا فعلها شخص آخر، أو مجموعة أخرى، فهذا لا يهم. فهو في الواقع يستحق الثناء لأنه مَن أراهم الطريق. لم يكن أي شخص آخر يمتلك الشجاعة للبحث عن موجات الجاذبية حتى أظهر ويبر أن ذلك كان في نطاق الممكن».[٢٠]

لكن على الرغم من النتائج المحبِطَة لتجارب ويبر، كان هناك بصيص من الأمل؛ ففي عام ١٩٧٤ كان جو تايلور ورسل هالس يستخدمان التلسكوب الراديوي أريسيبو البالغ قطر أطباقه ٣٠٥ أمتار لرصد النجوم النابضة. وجد الباحثان نجمًا نابضًا يدور حول محوره ١٧ مرة في الثانية، لكنهما لاحظا تباينًا منتظمًا في وصول النبضات. كان التباين يحدث كل ثماني ساعات، ممَّا أشار إلى وجود نظام ثنائي. كشفت عمليات الرصد الإضافية أن النظام «بي إس آر ١٩١٣+١٦» (PSR 1913 + 16) - أو «ثنائي هالس-تايلور» - كان عبارة عن نجمين نيوترونيين في مدار ضيق لا يزيد حجمه عن حجم الشمس. أدرك تايلور وهالس أن النسبية العامة تنبأت بتدهور مداري في النظام الثنائي؛ إذ ينبغي أن تقل الفترة المدارية بمقدار ٧٧ ميكروثانية في السنة، حيث تُنقل الطاقة بواسطة موجات الجاذبية. إن النجوم النابضة ساعات دقيقة؛ لذلك كان الانزياح الزمني الضئيل ملحوظًا (شكل ٥٥). ويتطابق هذا التدهور المداري المرصود تمامًا مع



شكل ٥٥: التدهور المداري لنظام النجمين النابضين الثنائي «بي إس آر ١٩١٣+١٦» (PSR 1913 + 16)، كما رُصد عبر التلسكوب الراديوي أريسيبو البالغ قطر أطباقه ٣٠٥ أمتار عن طريق رسل هالس وجو تايلور. يفقد هذا النظام الطاقة عن طريق إصدار موجات جاذبية، وتتوافق البيانات تمامًا مع التنبؤ النظري للنسبية العامة. كانت هذه البيانات الرصدية تأكيدًا قويًّا على صحة النسبية العامة وتأكيدًا غير مباشر على وجود موجات الجاذبية.

«إنداكتيفلود»

تنبؤ النسبية العامة.[٢١] كان هذا دليلًا قويًا، رغم أنه غير مباشر، على موجات الجاذبية.[٢٢] وحصل تايلور وهالس على جائزة نوبل في الفيزياء في عام ١٩٩٣ لإجراء عمليات الرصد الدقيقة هذه.

مهَّد نظام النجمين النابضين الثنائي الطريق نحو المزيد؛ حيث اكتُشفت عشرات الأنظمة الأخرى. وأدرك علماء الفلك أن الأنظمة الثنائية المحتوية على ثقوب سوداء لا بد أن تكون موجودة أيضًا، مع وجود جاذبية أقوى وبالتالي موجات جاذبية أكثر قوة. وربما باستخدام أجهزة رصد أكثر حساسية بما فيه الكفاية، يمكن رصد هذه الموجات مباشرة.

عندما تتصادم الثقوب السوداء

هذه هي قصة طريقة تشكُّل ثقبين أسودين، وكيف أن تصادمهما أطلق في غمضة عين العنان لسيل من موجات الجاذبية التي تحتوي على قوة أكبر بعشر مرات من ضوء كل النجوم في الكون، كما أنها أيضًا قصة ولادة مجال جديد في علم الفلك.

حدث هذا منذ ١١ مليار سنة، عندما كان الكون مكانًا وثيرًا أصغر بثلاث مرات وأكثر كثافة بثلاثين مرة ممَّا هو عليه الآن؛ تلك كانت «مرحلة بناء» الكون، عندما كانت المجرَّات صغيرة وكثيفة، ويندمج بعضها مع بعض وتتشكل النجوم على نحو نشط. في مجرَّة صغيرة غير مميزة، يتشكل نجمان هائلان بالقرب من أحدهما الآخر في منطقة فوضوية مليئة بالغاز والغبار. تبلغ كتلتهما ٦٠ و١٠٠ كتلة شمسية؛ وهذه هي أكبر كتلة يمكن للنجوم أن تصل إليها. في غضون بضعة ملايين من السنين – وهي مدة تساوي طرفة عين بالنسبة للكون – يستهلك كلا النجمين وقوده النووي، ويعيش النجم الضخم على نحو أسرع ويموت أولًا، ولكن مع تقدمه في العمر وتضخمه، يسرق صاحبه الأصغر الغاز منه ويتفوق عليه في الكتلة ويصبح ثقبًا أسود أولًا. يمتص الثقب الأسود الغاز من رفيقه، ويختفي زوج النجوم تحت غطاء من الغاز الذي تسببه الحركة المدارية. كما يمتص الغاز الطاقة من المدار، وبذلك يصبح النجمان قريبين كقرب عطارد من الشمس، ثم يموت النجم الثاني ويصبح ثقبًا أسود.

في نهاية مرحلة مص الدماء تلك، يتبقى ثقبان أسودان؛ يخفي كل منهما كتلة تساوي ٣٠ ضعفًا لكتلة الشمس وراء الحجاب الذي لا يمكن اختراقه لأفق حدث يبلغ قطره ١٥٠ ميلًا، ويدور كلٌّ منهما حول الآخر بحذر، مربوطين برباط الجاذبية.[٢٣]

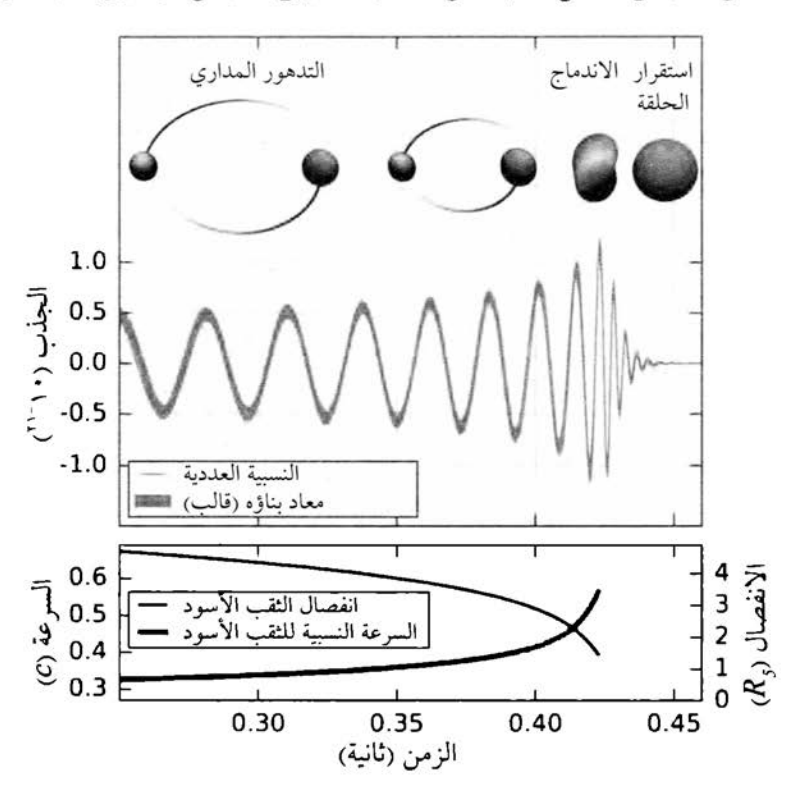
لمدة ١٠ مليارات سنة كاملة، لم يحدث أي شيء. يدور الثقبان في صمت وفي ظلام، ويُصدران بالكاد مقدارًا ضئيلًا من موجات الجاذبية التي تقربهما من بعضهما على نحو ضئيل. وبعيدًا عن هذين الثقبين الأسودين، يتسع الكون ويتقدم في العمر ويزداد برودة. وينتقل معدل التمدد الكوني من التباطؤ إلى التسارع حيث تنتقل المسئولية من المادة المظلمة إلى الطاقة المظلمة. تتزايد وتيرة تشكل النجوم وتنخفض، ولا شك تظهر حضارات فضائية على أسطح العديد من الكواكب الشبيهة بالأرض وتختفي أيضًا. لكن في الوقت ذاته لا تزال الحياة على هذا الكوكب الذي نسميه وطننا، وبعد ثلاثة مليارات من السنين التي أعقبت بداية الحياة، ميكروبية.

ثم يتصاعد النشاط؛ فمع تقارب الثقبين الأسودين، تزداد قوة الجاذبية وينبعث مزيد من موجات الجاذبية، ما يؤدي إلى تقلُّص المدار وتسريع العملية. تستغرق المراحل الأخيرة فقط جزأين من عشرة أجزاء من الثانية. يزيد الثقبان الأسودان من سرعتهما المدارية ويدخلان في دوامة الموت. ويضطرب الزمكان فيما يشبه قِدرًا من ماء يغلي. وتنشأ موجات الجاذبية بتردد يطابق الفترة المدارية؛ فيرتفع بسرعة تتراوح ما بين ٣٥ هرتز و٣٥٠ هرتز. ولتقريب ما يحدث بمثال من الصوت، عليك أن تضرب بيدك لوحة مفاتيح البيانو من زر A المنخفض إلى زر C المتوسط خلال كسر ضئيل من الثانية. تخيَّل مدارًا مألوفًا، مثل مدار القمر حول الأرض. يستغرق هذا المدار شهرًا مع فاصل تبلغ مسافته ربع مليون ميل. أما في نهاية دوامة الموت، فإن هذين الثقبين الأسودين - اللذان تزيد كتلة كلٍّ منهما عن كتلة الأرض عشرة ملايين مرة - تفصل بينهما مسافة ١٠٠ ميل تقريبًا، ويدور كلٌّ منهما حول الآخر ٣٠٠ دورة في الثانية، أو بنصف سرعة الضوء. هذا ليس مدارًا؛ بل هذا جنون.

ثم يتماس أفقا الحدث ويندمج الثقبان الأسودان، لا يمكن حل معادلات هذا الحدث؛ بل حتى أجهزة الكمبيوتر العملاقة تجد صعوبة في حساب ما يحدث. تسمى هذه المرحلة الأخيرة «استقرار الحلقة»، حيث يتأرجح الجرم المدمج ككرة ضخمة من الهلام المظلم قبل أن يستقر في صورة ثقب أسود واحد ذي كتلة تساوي ضعف كتلة الثقبين الأسودين المصطدمين وبضعف حجمهما (شكل ٥٦). في حسابات الجاذبية، تتحول ٥٪ من الكتلة إلى موجات جاذبية، تتحول كتلة تساوي مليون ضعف لكتلة الأرض إلى طاقة تموجات في الزمكان وتهرب من الحبس داخل الثقب الأسود. (وللمقارنة، تحوِّل الشمس في الثانية الواحدة كتلة تساوي واحد على ألف تريليون من

كتلة الأرض إلى طاقة إشعاع). تهرب نبضات موجات الجاذبية بسرعة الضوء، وتسير في كل الاتجاهات مثل الأمواج في بركة الماء ثلاثية الأبعاد. ويحدث أكبر انفجار على الإطلاق في الكون في صمت وظلام دامس.

تندفع التموجات بقوة عبر فراغات الفضاء بين المجرَّات، وتضعف كلما ابتعدت عن مصدرها، وتمر عبر ملايين المجرَّات، ربما دون أن يلاحظها أحد. وفي هذه الأثناء، على الأرض، تنتقل الحياة من المحيطات إلى الأرض، وتظهر الديناصورات



شكل ٥٦: المراحل الأخيرة من اندماج الثقبين الأسودين اللذين خلَّفهما نجمان ضخمان ماتا في صورة مستعرين أعظمين. بعد تقارب بطيء دام ملايين السنين، يدور الثقبان الأسودان حلزونيًّا في اتجاه أحدهما الآخر، ويندمجان ويرتدان قبل أن يستقرا. هذا التسلسل بأكمله يستغرق أقل من ٠,٢ ثانية. تُظهر اللوحة الوسطى إشارة موجة الجاذبية التي تنبأت بها النسبية العددية، وتوضح اللوحة السفلية أن الثقبين الأسودين يندمجان بسرعة تزيد عن نصف سرعة الضوء.

«مبادرة التعاون العلمي التابعة لمشروع ليجو/معهد الفيزياء»

وتنقرض بسبب كارثة عالمية، ويطور فرع من خط الرئيسيات مخاخًا كبيرة. وبينما تغمر موجات الجاذبية المجرتين المجاورتين لنا، سحابتي ماجلان، يتعلم أسلافنا كيفية تسخير النار. وعند دخولها مجرَّة درب التبانة، يغادر البشر أفريقيا لأول مرة. وتمر الموجات بالقرب من النجم الأكثر سطوعًا «بيتا فولانتيس» (Beta Volantis) في كوكبة «السمكة الطائرة» بينما ينشر ألبرت أينشتاين نظريته الجديدة للجاذبية. وتمر بالقرب من النجم القزم «٨٢ القيض» (Eridani 82) حيث يبدأ بناء أداة علمية ضخمة في مواقع منفصلة على نطاق واسع في الولايات المتحدة. تتوقف الأداة عن العمل لمدة خمس سنوات لإجراء ترقيات عليها، وتستعد لاستقبال البيانات العلمية لأول مرة بينما تجتاح الموجات النظام الشمسي وتهبط على الأرض.

انتفض ماركو دراجو معتدلًا في جلسته. كان باحث ما بعد الدكتوراه الإيطالي البالغ من العمر ٣٢ عامًا يرتشف كوب الكابتشينو أمام شاشة الكمبيوتر الخاص به في معهد ألبرت أينشتاين في ألمانيا، عندما رأى خطوطًا متعرجة صغيرة على الشاشة. يقوم البرنامج في البداية بوصف الحدث على أنه خلل، ولكن بعد إجراء عمليات تدقيق تلقائية يُزال هذا الوصف. يدرك ماركو أن الكون يتحدث؛ لذا يكتب رسالة بريد إلكتروني بعنوان «حدث مثير جدًّا للاهتمام». إنه مسئول عن أدق آلة تم تصميمها على الإطلاق.

أدق آلة تم تصميمها على الإطلاق

كم عدد علماء الفيزياء الذي يتطلَّبه قياس تغير يبلغ واحدًا على عشرة آلاف من قطر البروتون؟ الجواب: أكثر من ألف. ماركو دراجو واحد من جيش صغير من العلماء يعملون في عشرات الجامعات والمؤسسات البحثية في جميع أنحاء العالم على أكثر الأدوات العلمية التي تم تصوُّرها حساسية على الإطلاق. إن قصة بناء مرصد «الموجات التثاقلية بمقياس التداخل الليزري»، أو «ليجو» (LIGO)، تكاد تماثل في غرائبيتها اكتشاف تموجات الزمكان.

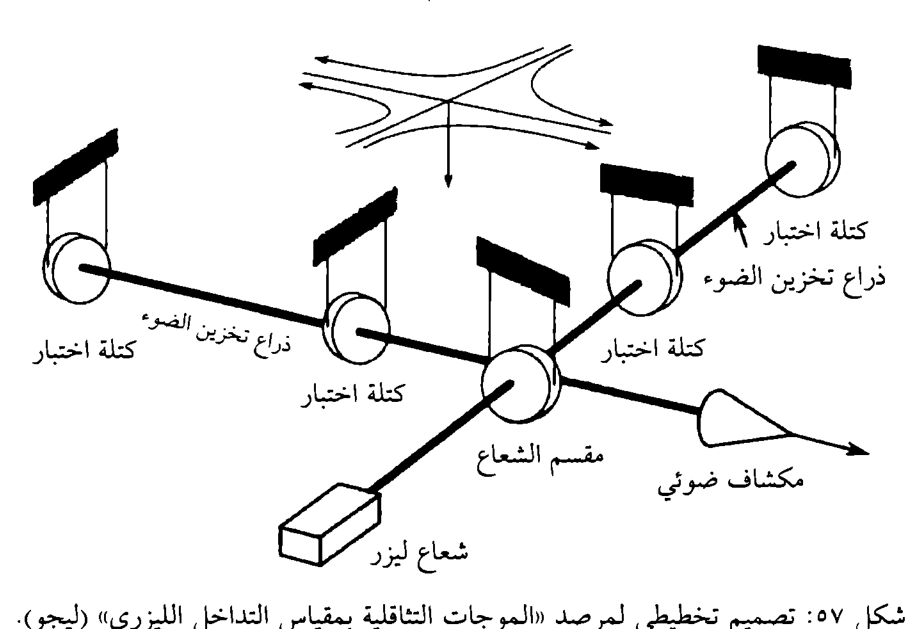
عندما تركنا قصة رصد موجات الجاذبية، كان هذا المجال في حالة من الفوضى؛ إذ لم يستطع أحد إعادة إنتاج نتائج ويبر وكانت سمعته العلمية في حالة يُرثى لها، ورغم أن هذا يبدو أمرًا يفتقر إلى الإنصاف، فإن وصمة العار تلك لاحقت سمعته في كل مكان، فصار صيادو موجات الجاذبية إما مشعوذين أو حمقى، وربما الاثنين على حد سواء.

لكن كانت هناك مجموعة من الباحثين مدفوعة بإحباط ناجم عن عجزها عن إعادة إنتاج نتائج ويبر؛ فقد كان القيام بعمل أفضل من عمله يمثل تحديًا بالنسبة لهم كباحثين تجريبيين. انجذبت هذه المجموعة إلى بيانات رصد تايلور وهالس للنجمين النابضين، والتي كانت دليلًا على وجود موجات الجاذبية. أحد هؤلاء الرجال - لأنه كان وما زال مجالًا يهيمن عليه الذكور - هو راينر فايس، الفيزيائي في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. عندما كان فايس طفلًا، هرب من الحكم النازي في ألمانيا مع أسرته، ونشأ في نيويورك يعاني بعض الإهمال، لكنه انغمس في شغفه بالموسيقى الكلاسيكية والإلكترونيات. كان قد انقطع عن الدراسة في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وكان عليه أن يبدأ من القاع كفني في مختبر الفيزياء، ثم عاد إلى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لكنه كافح من أجل الحصول على وظيفة فيه. وأصيب بالإحباط وهو يحاول شرح نتائج ويبر لطلابه، وعن ذلك يقول: «لم أستطع طوال حياتي أن أفهم ما كان يفعله ويبر. لم أكن أعتقد أنه كان على حق؛ لذلك قررت أن أفعل ذلك بنفسي».[٢٤]

عمل فايس لمدة صيف كامل منعزلًا في أحد الأقبية على فكرة نشأت من مناقشاته مع طلابه في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا،[٢٥] وتوصل إلى جهاز رصد كان عبارة عن مقياس تداخل بدلًا من الأسطوانة الواحدة. تخيَّل أسطوانتين معدنيتين متصلتين بزاوية قائمة، وتشكيلان حرف L. إذا وصلت موجة الجاذبية من أعلى فإن الطريقة التي تضغط بها وتمدد الفضاء تعني أنها تجعل إحدى الأسطوانتين أقصر قليلًا، بينما تكون الأخرى أطول قليلًا. وبعد ذلك يحدث العكس، ويتكرر النموذج طالما كانت الموجة نشطة. بدلًا من محاولة رصد أسطوانة واحدة ترنُّ مثل الجرس، سيتعين على فايس رصد أسطوانتين تتناوبان على الانحناء.

لقد كانت تجربة ويبر أقل حساسية بآلاف المرات من أن ترصد ما صُنِعَت لرصده، وأدرك فايس أنه كان عليه إجراء تحسينات هائلة، كانت فكرته الذكية هي استخدام الضوء كمسطرة، وكانت «أسطوانتاه» عبارة عن أنابيب معدنية طويلة مفرغة من الهواء، حيث ينتقل الضوء بسرعة ثابتة في الفراغ. ويبعث الليزر الموجود في منعطف حرف L ضوءًا بطول موجي واحد عبر مقسم شعاع، بحيث يتوجه نصف الشعاع عبر إحدى الأسطوانتين بينما يتجه النصف الآخر عند الزاوية القائمة عبر الأخرى. وينعكس الضوء على مرآة في نهاية كل أسطوانة، ويعود إلى منعطف حرف L، ويعاد تجميعه عند جهاز رصد. عادةً ما تنعكس موجات الضوء عبر كل أسطوانة في تزامن مثالي، حيث تتسق

القمم والقيعان. ولكن عندما تمر موجة جاذبية عبر الجهاز، فإن أحد الشعاعين ينتقل مسافة أقصر قليلًا من الآخر؛ لذا لا تتسق القمم والقيعان وتقل شدة الضوء (شكل ٥٧).



شكل ٥٧: تصميم تخطيطي لمرصد «الموجات التاقلية بمقياس التداخل الليزري» (ليجو). تُصور موجة الجاذبية على أنها قادمة من أعلى. يمر الضوء عبر مقسم شعاع وعبر أذرع طولها ٤ كيلومترات، وينعكس من أجل إعادة تجميعه في المكشاف الضوئي. تسجل كتل الاختبار على طول كل ذراع وصولَ موجة الجاذبية في صورة تغيرات طفيفة جدًّا في طول الذراعين، والتي تُسجل كنمط للتداخل بواسطة جهاز المكشاف الضوئي.

«معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا/معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا/ مختبر ليجو»

يبدو هذا بسيطًا. يتمثل التحدي في تحري الدقة الشديدة عند القياس، فليس حجم تموج الزمكان صغيرًا جدًّا وحسب؛ بل إن طوله الموجي طويل للغاية، التردد الطبيعي لموجات الجاذبية الناتجة عن تصادم ثقبين أسودين هو ١٠٠ هيرتز، ممَّا يعني أن ١٠٠ تموج يمر كل ثانية. لكن الطول الموجي العادي هو ٣٠٠٠ كيلومتر، والطول الأمثل لأذرع هذا الجهاز هو ربع الطول الموجي؛ لأن التغير بمقدار ربع موجة في أي اتجاه يمثل الفرق بين تعزيز الإشارة وإلغائها. كان فايس يعرف أنه لا يستطيع صنع أنبوب مفرَّغ بطول ٧٥٠ كيلومترًا؛ لذلك تخيَّل عكس الضوء عدة مرات في أنبوب أقصر. كتب فايس هذه الفكرة في تقرير تقني لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا

عام ١٩٧٢. وربما تكون تلك الورقة البحثية هي أكثر الأبحاث العلمية التي لن تنشر أبدًا في أي مجلة علمية من حيث التأثير.[٢٦]

لكن الطريق كان صعبًا في البداية؛ فقد بدأ فايس العمل على مقياس تداخل أولِي بأذرع طولها ٥ أقدام، ورغم أنه كان أصغر بمئات المرات وأقل تكلفة من أي أداة صالحة لرصد موجات الجاذبية، فإنه واجه مشكلة في جمع أموال كافية لتمويله. كان المسئولون متشككين، وكان فيليب موريسون زميله ذو النفوذ القوي، من أكثرهم تشككًا. ففي أوائل سبعينيات القرن العشرين لم يكن هناك دليل قوي على أن «الدجاجة إكس-١» ثقب أسود، كان موريسون لا يعتقد في الثقوب السوداء، وبما أنها كانت أقوى المصادر المحتملة لموجات الجاذبية، فقد رأى أن فايس كان يُضيّع وقته، حصل فايس على بعض المال من مصادر عسكرية، لكن هذا التمويل توقف بسبب تعديل قانون التفويض العسكري الذي منع الجيش من دعم المشاريع المدنية.

في أحد أيام صيف عام ١٩٧٥ ذهب راينر فايس إلى مطار دالاس في واشنطن العاصمة، ليصطحب الفيزيائي النظري الشهير في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا كيب ثورن من المطار، وهو الرجل الذي فاز في رهان ستيفن هوكينج حول وجود الثقوب السوداء. يعمل العلم على نحو أفضل عندما تعمل النظرية وبيانات الرصد في تناغم، وتدفع التنبؤات النظرية نحو عمليات رصد أفضل، وعمليات الرصد تدفع نحو فهم فيزيائي أعمق. نشأ مشروع «ليجو» في ذلك اليوم الحار في واشنطن، عندما قابل العالم التجريبي فايس ثورن الذي هو واحد من أكبر المُنظِّرين في عصرنا.

كان فايس قد دعا ثورن إلى اجتماع في مقر ناسا حول إجراء أبحاث علم الكونيات والنسبية في الفضاء. وعن ذلك يتذكر فايس قائلًا: «أقللت كيب من المطار في ليلة صيف حارة عندما كانت واشنطن مليئة بالسياح، ولم يكن لديه حجز في فندق؛ لذا تشاركنا غرفة لليلة. وصنعنا خريطة ضخمة على قطعة من الورق تتضمن جميع النطاقات المختلفة في الجاذبية. أين يكمن المستقبل؟ أو ماذا كان هذا المستقبل، أو ما يجب فعله؟»[٢٧] واستغرقا في حديثهما لدرجة أنهما لم يناما هذه الليلة.

لم يقرأ ثورن بحث فايس التقني حول فكرة مقياس التداخل، وقال في وقت لاحق: «لو كنت قد فعلت ذلك، فبالتأكيد لم أكن سأفهمه». في الواقع يشتمل كتابه «الجاذبية» على تمرين للطلاب مصمَّم لإظهار عدم إمكانية اكتشاف موجات الجاذبية

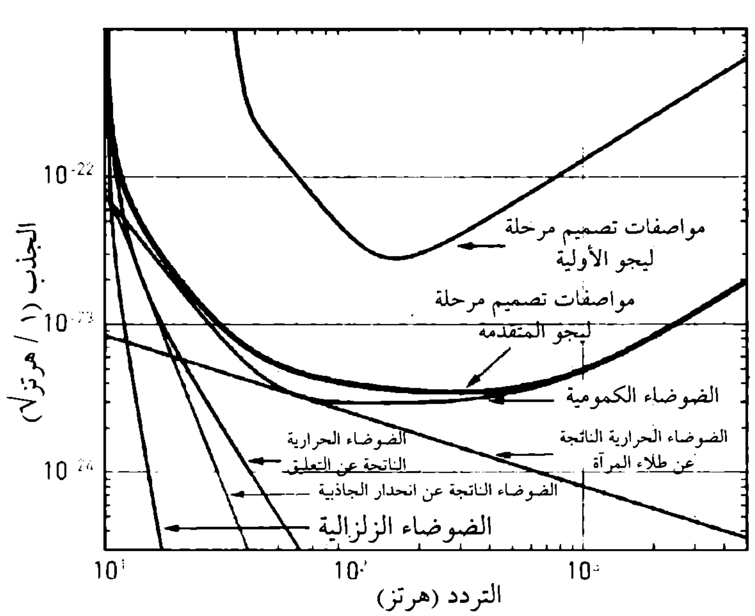
باستخدام الليزر. واعترف ثورن قائلًا: «لقد غيرت رأيي بشأن هذا بسرعة كبيرة».[٢٨] ثم عاد إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا متحمسًا للغاية حيال صنع مقياس تداخل، لكنه احتاج أولًا إلى توظيف فيزيائي تجريبي. اقترح فايس تعيين رون دريفر من جامعة جلاسكو، أجرى دريفر تجارب أساسية على سلاسة الفضاء وكتلة النيوتريونات، وبنى وشغَّل أسطوانة ويبر، وصنع مقياس تداخل بأذرع بطول ١٠ أمتار، وأكبر بستة أضعاف من الأداة المتواضعة التي صممها فايس في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. منح ثورن لدريفر وظيفة بنصف دوام في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وبحلول عام ١٩٨٣ كان قد بنى مقياس تداخل بأذرع يبلغ طولها ٤٠ مترًا، مستخدمًا طرقًا بارعة لزيادة طاقة الليزر وتحسين العزل عن الضوضاء الزلزالية.

بدأت الأموال تتدفق وبدأت المنافسة تحتدم، وتلقَّى فايس منحة صغيرة من المؤسسة الوطنية للعلوم في عام ١٩٧٥ لبدء عمله على مقياس التداخل الخاص به، وفي عام ١٩٧٩، حصلت مجموعة معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا بقيادة ثورن ودريفر على منحة كبيرة، بينما حصلت مجموعة معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا التي يقودها فايس على مبلغ أقل من المال. لطالما كان معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا متنافسين لدودين في مجال العلم،[٢٩] وكان من الواضح أن مجموعة معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا كانت في الطليعة بمقياسها للتداخل الذي يبلغ طوله ٤٠ مترًا. لا بد أن فايس ندم على توصيته دريفر إلى ثورن، فقد كانت كلتا المجموعتين تحلم بمقياس تداخل كبير بطول كيلومتر، لكن فايس كان هو الذي استغلَّ هذا النشاط بزيارة المؤسسة الوطنية للعلوم، حيث قدَّم فكرة مقياس تداخل في موقعين بقيمة ١٠٠ مليون دولار، وسُميت دراسة التصميم التي نتجت عن هذه الفكر باسم «الكتاب الأزرق»، وهي الكتاب المقدس الفعلي لرصد تموجات الزمكان.[٣٠]

كان فايس ودريفر في تنافس محتدم، ووجد ثورن نفسه في دور الوسيط وحمامة السلام بينهما، وقد أوضحت المؤسسة الوطنية للعلوم أنه لن يتم تمويل المجموعتين بشكل منفصل؛ لذا فقد وجدوا أنفسهم في حالة تشبه الزواج القسري، وجاء التقدم على شكل متناوب متقطع. لكن التأخيرات المستمرة الناتجة عن المشكلات الفنية دفعت المؤسسة الوطنية للعلوم لإيقاف التمويل.[٣١] وبحلول منتصف تسعينيات القرن العشرين، عاد مختبر ليجو إلى مساره، بقيادة متخصص فيزياء الطاقة العالية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا باري باريش. إن تاريخ العلم مليء بالمشروعات التي فشل فيها

العلماء المشاهير بسبب الافتقار إلى المهارات الشخصية ومهارات الإدارة، لكن باريش أثبت أنه مدير بارع.

خطط الفريق من البداية لبناء مقياسين للتداخل متطابقين مع أذرع طولها ٤ كيلومترات، تقع على طرفين متقابلين من الولايات المتحدة، في موقعين هادئين جيولوجيًّا. كان أحدهما بالقرب من مفاعل نووي مهجور في صحراء ذات أشجار قصيرة متفرقة تقع خارج هانفورد بواشنطن، وكان الآخر في منطقة مستنقعات خارج باتون روج بلويزيانا. كان هدف المرحلة الأولى - التي كانت تسمى «مرحلة ليجو الأولية» (iLIGO) - تطوير التكنولوجيا، ولم يكن الرصد الفعلي مرجحًا كثيرًا، أما المرحلة الثانية - مرحلة ليجو المتقدمة (aLIGO) - فكانت تهدف إلى أن تكون



شكل ٥٨: حساسية مرصد «الموجات التثاقلية بمقياس التداخل الليزري» (LIGO). يتضح هذا في سياق «الشد»، والذي يقارب التغير الكسري في طول كتلة الاختبار عندما تمر موجة الجاذبية مباشرة من خلالها. عند الترددات المنخفضة، تتقيد الحساسية كثيرًا بالضوضاء الجيولوجية وتأثيرات الجاذبية على المرايا. وعند الترددات العالية، تتقيد الحساسية بالضوضاء الكمومية في أجهزة الرصد. إن الزيادة في الحساسية من مرحلة ليجو الأولية إلى مرحلة ليجو المتقدمة قد تضاعفت على الأقل بمعامل ١٠.

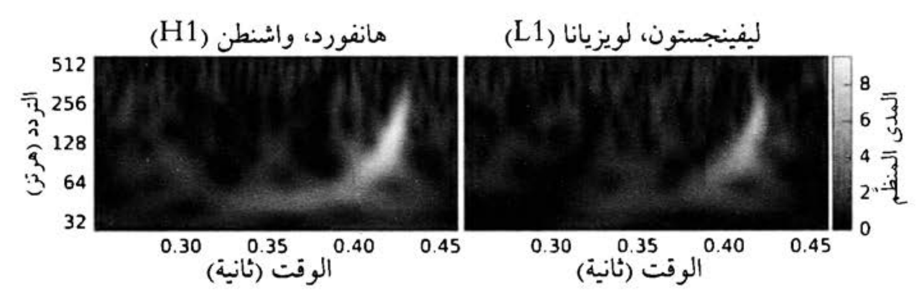
«مبادرة التعاون العلمي التابعة لمشروع ليجو»

حساسة بما يكفي لرصد موجات الجاذبية التي تنبأت بها النظرية (شكل ٥٨). أراد باريش منشأة وبنية تحتية يمكن من خلالهما تطوير جميع المكونات الرئيسية - الأنظمة المفرغة، والعدسات، وأجهزة الرصد، وأنظمة التعليق - على نحو مستمر.

تطلبت حساسية مرحلة ليجو المتقدمة الأكثر شدة ترقيات في كل جانب تقريبًا من جوانب التجربة، أصبح الليزر أكثر قوة، للحدِّ من المصدر الرئيسي للضوضاء عالية التردد. وزيد وزن كتل الاختبار عند طرفي كل ذراع، إذ كانت كل كتلة اختبار عبارة عن أسطوانة من السيليكا يبلغ وزنها ٤٠ كيلوجرامًا، ومثبَّت عليها مرآة مصممة لرصد التغيرات الطفيفة في طول الذراع. واستُخدم بندول مكون من أربع مراحل للتعليق، وتحسَّن العزل وإلغاء الضوضاء بأضعاف مضاعفة. ويمتلك جهاز ليجو أكبر وأفضل نظام مفرغ تم بناؤه على الإطلاق، حيث تطلب ٣٠ ميلًا من اللحامات دون تسريب، والأنابيب طويلة للغاية لدرجة أنها تعلو فوق الأرض بمتر عند كل طرف حيث تنحني الأرض تحتها. وكانت هناك حاجة لأكثر طرق صب الخرسانة والموازنة دقة على الإطلاق، لمواجهة هذا الانحناء وإبقاء الأنابيب مفرودة ومستوية. وتبلغ كثافة الفراغ جزءًا من تريليون جزء من كثافة الهواء عند مستوى سطح البحر. وأجهزة الرصد حساسة للغاية بحيث يمكن أن تشعر بمكابح شاحنة على بُعد ثلاثة أميال وتسمع العواصف الرعدية من مسافة ٥٠ ميلًا. وربما الأكثر إثارة للإعجاب هو أنها تستطيع رؤية حركة الذرات الفردية في المرايا الخاصة بها.

التجربة دليل على البراعة الفنية، لقد تم تشغيل مرحلة ليجو الأولية من عام ٢٠٠٢ إلى عام ٢٠١٠، وكما هو متوقع لم ترصد موجات الجاذبية، واستغرقت الترقية إلى مرحلة ليجو المتقدمة خمس سنوات وعمل ٥٠٠ شخص. وتم تشغيلها في وضع اختبار هندسي لمدة ستة أشهر وقد حققت نجاحًا قبل أربعة أيام من الموعد المقرر لبدء جمع البيانات العلمية.

وهذا يعيدنا إلى ماركو دراجو وصباح يوم ١٤ سبتمبر ٢٠١٥، هذا الباحث في مرحلة ما بعد الدكتوراه يعزف الموسيقى الكلاسيكية على البيانو، كما أنه كتب روايتين خياليتين خلال ذلك الوقت الذي قضاه بعيدًا عن عمله في مجال الفيزياء. عندما رأى الخطوط المتعرجة على شاشته، امتلأت نفسه بالشكوك على الفور. كانت الخطوط تمتلك النمط الكلاسيكي لاندماج الثقوب السوداء، وهو عبارة عن تصعيد قصير يطلق عليه الباحثون مسمى «زقزقة»، كما لو كان الكون يغرد كطير شادٍ. فبعد أكثر من



شكل ٥٩: الإشارة (GW150914)، أول عملية رصد لحدث جاذبية على الإطلاق. يظهر نمط «الزقزقة» الكلاسيكي الدال على اندماج ثقبين أسودين في رسم بياني لمدى موجة الجاذبية مقابل ترددها. وصلت الإشارة إلى جهاز الرصد في مرصد ليجو في هانفورد قبل أن تصل إلى جهاز الرصد في مرصد ليجو في ليفينجستون بسبعة مللي ثانية، وهو ما يتوافق مع الوقت الذي تستغرقه موجات الجاذبية للتنقل بين الموقعين.
«مبادرة التعاون العلمي التابعة لمشروع ليجو/معهد الفيزياء»

مليار عام من السفر عبر الفضاء، مرت الموجة عبر الأرض بسرعة الضوء، مصطدمة بجهاز الرصد في ليفينجستون في واشنطن قبل أن تصطدم بجهاز الرصد في الطرف الآخر عند هانفورد بلويزيانا بسبعة مللي ثانية (شكل ٥٩). كان دراجو متشككًا لأن الإشارة بدت قوية جدًّا ومثالية للغاية، وعن هذا يقول: «لم يكن أحد يتوقع شيئًا بهذا الحجم؛ لذا افترضت زيفها».[٣٢] كان المشرفون على مشروع ليجو يبقون الفريق على أهبَّة الاستعداد عن طريق حقن إشارات زائفة وسط البيانات المتدفقة، وكان يطلقون عليها اسم «الحقن العمياء». في عام ٢٠١٠ أدت حقنة عمياء إلى إثارة كبيرة وكتب عنها ورقة بحثية، وعندما كانت الورقة البحثية على وشك النشر، أُخبر الفريق أن الإشارات كانت مزيفة.

بذل دراجو جهدًا حثيثًا للتأكد، واتصل بجميع المواقع الأخرى وتحدث مع قائد المجموعة للتأكد من أن أحدًا لم يقحم إشارة زائفة في النظام. حتى إنه قلق من أن يكون شخص ما قد اخترق النظام كمزحة، وبعد عشرات الاختبارات الأوتوماتيكية واليدوية، لم يكن هناك شك في أن الكون كان مسئولًا عن هذه الإشارة. وبرزت وسط الضوضاء كانفجار من الضحكات في غرفة مليئة بهمهمات الناس، لقد تحدثت الجاذبية.

فلنقابل مايسترو الجاذبية

كان طموح أبرز مُنظِّري الجاذبية في العالم الأولي أن يكون سائق كاسحة ثلوج، كان كيب ثورن يعيش في منزل وسط الجبال والعواصف الثلجية وهو طفل. وعن ذلك يقول: «أن تنشأ وسط جبال روكي، فهذه أكثر الأعمال المجيدة التي يمكنك تخيُّلها. ولكن بعد ذلك أخذتني والدتي إلى محاضرة حول النظام الشمسي ومنذئذ أدمنت الفلك».[٣٣] نشأ ثورن على عقيدة المورمون في منطقة محافظة في ولاية يوتاه، ولكنه صار الآن ملحدًا، وكان كلا والديه أكاديميًّا؛ لذا فقد شجعا فضوله.

سارت حياة ثورن المهنية كالصاروخ؛ فبعد حصوله على شهادات من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وجامعة برنستون، عاد إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، حيث غدا واحدًا من أصغر من نالوا درجة الأستاذية الكاملة. لقد غادر ولاية يوتاه مورمونيًّا عبقريًّا غريب الأطوار، يتوارى خجله وراء لحية مسيحية. لكنه في سن الثلاثين صار خبيرًا عالميًّا في الفيزياء الفلكية للجاذبية، يفضِّل ارتداء الجينز والسترات الجلدية السوداء وعلى وجهه لحية العثنون الحديثة.

قدَّم ثورن أطروحته للحصول على درجة الدكتوراه في عهد جون ويلر في جامعة برنستون.[٣٤] طرح ويلر سؤالًا مثيرًا، ألا وهو: هل يمكن أن تنفجر مجموعة من خطوط المجالات المغناطيسية الأسطوانية بفعل قوة جاذبيتها؟ تقاوم خطوط المجال المغناطيسي بعضها بعضًا، وبعد حسابات صعبة أثبت ثورن أنه من المستحيل أن ينفجر المجال المغناطيسي الأسطواني. وهذا أدى إلى سؤال آخر: لماذا إذن يمكن أن تنفجر النجوم الكروية، والتي يعتمد ترابطها أيضًا على خطوط المجال المغناطيسي، وتتحول إلى ثقوب سوداء؟ اكتشف ثورن أن الجاذبية لا يمكنها التغلب على الضغط الداخلي إلا عندما تعمل في جميع الاتجاهات. تخيَّل حلقة يمكن أن تدور لتصنع أثرًا ككرة، أي جرم له الكتلة M تكون حوله حلقة ذات محيط يساوي $4\pi GM/c^2$ ويمكن أن تدور، لا بد أن يكون ثقبًا أسود (حيث G هو ثابت الجاذبية وc هي سرعة الضوء). أُطلِقَ على هذا اسم «حدسية الحلقة»، ولقد جعل هذا ثورن نجمًا وقت أن كان قد تخرَّج لتوه في كلية الدراسات العليا.

ومع بلوغه منتصف الثلاثينيات من عمره، كان ثورن قد شارك في تأليف كتابه التاريخي «الجاذبية» (Gravitation)، وشرع في سلسلة رهاناته مع ستيفن هوكينج،

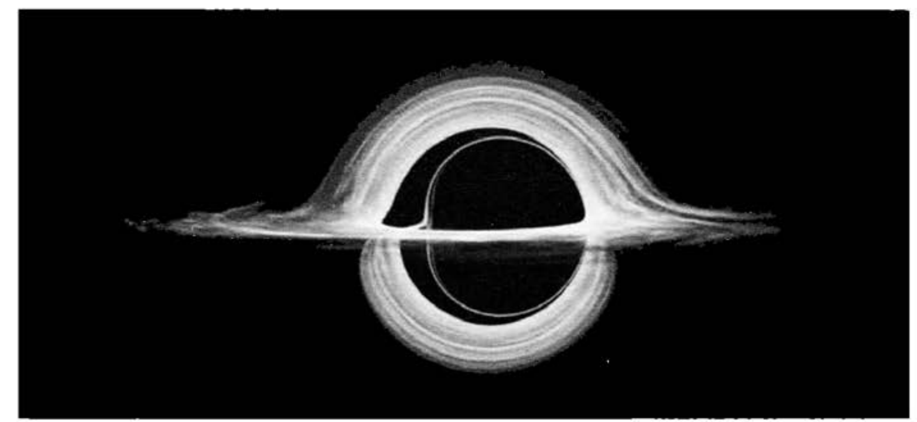
بصفته أحد مؤسسي مشروع ليجو، انغمس ثورن بشدة في مجال رصد موجات الجاذبية. كان يعلم أن اندماج ثقبين أسودين سيعطي أقوى أثر لموجات الجاذبية. ولكن كان ثمة مشكلة؛ ألا وهي أن الطريقة الوحيدة لحساب أقوى جزء من الإشارة، قبل الاندماج مباشرة، كانت باستخدام الحسابات؛ لأنه كما هو الحال في العديد من المواقف في النسبية العامة، لا يمكن حل المعادلات بدقة تامة. ومع ذلك، كانت عمليات المحاكاة عبر أجهزة الكمبيوتر العملاقة في ذلك الوقت غير مجدية على الإطلاق.

> «كنا على شبه يقين أن عمليات المحاكاة الحاسوبية هذه يجب أن تكون في متناول أيدينا بحلول الوقت الذي نبدأ فيه في رؤية موجات الجاذبية باستخدام مرصد ليجو. ولكن في تسعينيات القرن العشرين، وجدت مشاكل كبيرة في هذا المجال. استطاع هؤلاء العلماء البارعين في استخدام أجهزة الكمبيوتر أن يجعلا ثقبين أسودين يتصادمان مباشرة، ولكن عندما حاولوا جعل الثقبين الأسودين يدوران أحدهما حول الآخر، كما ينبغي أن يحدث في الطبيعة، لم يتمكنوا حتى من جعلهما يدوران مرة واحدة قبل أن تتعطل أجهزة الكمبيوتر. وبحلول عام ٢٠٠١ شعرت بالقلق؛ لأنني كنت أتوقع أن تعمل مرحلة ليجو المتقدمة في أوائل العِقد الثاني من القرن. لم يكن واضحًا حينها على الإطلاق أن عمليات المحاكاة ستكون متاحة في ذلك الوقت».[٣٥]

لذلك انسحب من العمليات اليومية للمشروع لبدء مجموعة النسبية الرقمية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وكورنيل.

يمتلك ثورن مهارات رائعة في تبسيط العلوم؛ فهو قادر على شرح الأفكار الصعبة بلغة بسيطة.[٣٦] وبما أنه كان المتحدث باسم مشروع ليجو، فقد كان قادرًا على إقناع السياسيين المحترفين الذين ليس لديهم خلفية علمية بتخصيص ما يزيد عن مليار دولار لإنشاء آلتين ضخمتين لرصد موجات افتراضية وغير مرئية وضعيفة للغاية، لدرجة أنها لا تستطيع إلا تحريك الذرات بنسبة ضئيلة من حجمها.

وكان قُربه من هوليوود قد أتاح الاستعانة في المشاريع التي تكون فيها الجاذبية ممثلًا رئيسيًّا، ففي أوائل ثمانينيات القرن العشرين، وضعه كارل ساجان في مقابلة لأول مرة مع المنتجة ليندا أوبست، واستغلت خبرته في رسم خريطة لمشهد السفر عبر الثقب الدودي في فيلم «اتصال» (Contact). بعد ذلك تواصلت أوبست معه



شكل ٦٠: صورة تمثيلية للثقب الأسود فائق الضخامة الذي يدعى «جارجنتوا» في فيلم «بين النجوم» (Interstellar) في عام ٢٠١٤. التشوُّهات الحقيقية للقرص المزوِّد عند رؤيته من هذا القرب ستكون أكبر من الموجودة في الصورة. وفي الفيلم يحمل الثقب الأسود مفتاح نجاح رائد الفضاء في السفر عبر الزمان والمكان وإنقاذ أهل الأرض، ويقع كوكب ميلر بالقرب من أعلى اليسار، وهو عالَم محيطي قريب جدًّا من الثقب الأسود يتباطأ الوقت فيه بشكل كبير.

«أو. جيمس/معهد الفيزياء»

عندما كانت تقوم بالتحضير لفيلم «بين النجوم» (Interstellar) مع المخرج كريستوفر نولان. يستخدم الفيلم ثقبًا أسود دوارًا عملاقًا يُدعى «جارجنتوا» لإبطاء الزمن، وعمل ثورن مع فناني الرسوم المتحركة لضمان دقة الصور علميًّا، استغرقت صناعة بعض الصور ١٠٠ ساعة وبلغ حجم بيانات الفيلم ما يقرب من مليون جيجابايت. حتى إن ثورن توصل لاكتشاف علمي من خلال عمليات المحاكاة، والذي سيؤدي إلى كتابة العديد من الأوراق البحثية.[٣٧] كان يرى تلك الصور جميلة لكنه يعتقد أنها جميلة أيضًا لأنها حقيقية (شكل ٦٠).

رؤية العالم بعيني الجاذبية

كل يوم تقريبًا يمر تموج الزمكان عبر جسمك بسبب اصطدام عنيف لثقبين أسودين في مكان ما في الكون، وربما تأتيك من أعلى أو من الجانب، أو من أسفل

قدميك، وتمضي في حياتك غير مدرك لهذا الاندساس. عندما تعبر الموجة تزداد طولًا قليلًا وتزداد نحافة قليلًا للحظة، ثم تزداد قِصَرًا قليلًا وتزداد بدانة قليلًا، وهكذا يتكرر هذا النمط. وبعد بضعة أعشار من الثانية، تعود عاديًّا مرة أخرى.

وهذا يجعل المرء يتذكر ردة فعل الروائي والشاعر جون أبدايك، تجاه الرسول الشبحي الآخر الذي يبعثه؛ النيوترينو حين قال:

الأرض مجرد كرة سخيفة
يمرون عبرها ببساطة،
كذرَّة غبار تمر عبر قاعة مفتوحة
أو الفوتونات المارة عبر قطعة من الزجاج.
إنهم يلفظون ذلك الغاز الأكثر روعة،
ويتجاهلون الجدار المتين،
والصلب البارد والنحاس الشديد،
ويقرعون الفرس الفحل في مربطه،
والحواجز الطبقية الحقيرة،
ويخترقوننا أنت وأنا! ويسقطون من أعلى
كمقصلة طويلة غير مؤلمة،
يقطعون رءوسنا ويسقطون على حشائش الأرض.[٣٨]

ثمة ثلاثة أنواع من موجات الجاذبية.[٣٩] أحد هذه الأنواع هو النوع التصادفي، وهي الكلمة التي تصف أي عملية فيزيائية ذات سمات عشوائية، وهذا هو أصعب نوع في رصده؛ لأن الإشارة تتداخل مع الضوضاء العشوائية الناجمة عن الإلكترونيات في الترددات العالية، ومع النشاط الجيولوجي في الترددات المنخفضة. ويأتي الشكل الأكثر إثارة للإشارة التصادفية من الانفجار العظيم، كما سنرى قريبًا. أما النوع الثاني فهو النوع الدوري، والذي يشير إلى موجات الجاذبية التي يظل ترددها ثابتًا تقريبًا لفترة طويلة. وتتمثل المصادر الأكثر شيوعًا للإشارات الدورية في النجوم النيوترونية والثقوب السوداء الموجودة في مدار أحدها حول الآخر، وبما أن هذه الأنظمة الثنائية بينها فواصل واسعة، فإن الإشارات تكون ضعيفة. ويسمى النوع الثالث الموجات

النابضة، وهذا يعني موجات الجاذبية التي تأتي في صورة دفقات قصيرة. تأتي هذه الدفقات من تكوين ثقب أسود من انفجار مستعر أعظم، ومن اندماج النجوم النيوترونية أو الثقوب السوداء، ويُتوقع أن تكون أقوى مصادر موجات الجاذبية، كما أن لها بصمة مميزة، ومن ثمَّ فإنها تمييزها عن الضوضاء يغدو أكثر سهولة.

تخيَّل الثقوب السوداء تتصادم فترن رنينَ جرس جاذبية، وتمامًا كما أن الجرس الكبير ينتج صوتًا منخفض التردد عن صوت الجرس الصغير، فإن الكتل الكبيرة التي تصطدم تنبعث منها موجات جاذبية منخفضة التردد عن موجات الجاذبية المنبعثة من تصادم الكتل الصغيرة. «تغني» النجوم النيوترونية بنغمة تصاعدية تصل إلى ١٦٠٠ هرتز، أما الثقوب السوداء ذات الحد الأدنى من الكتلة فحدُّها ٧٠٠ هرتز، والثقوب السوداء الضخمة المرصودة في الحدث الأول لبرنامج ليجو بدأت عند ١٠٠ هرتز وتصاعدت نغماتها إلى نحو ٣٥٠ هرتز. هناك ما يقرب من ثلاثة أضعاف عدد النجوم النيوترونية من الثقوب السوداء؛ لذلك بترتيب عدد الأحداث الأقل ذات الإشارة القوية، نتوقع أن نرى: عمليات اندماج بين نجمين نيوترونيين، وعمليات اندماج بين نجم نيوتروني وثقب أسود، وعمليات اندماج بين ثقبين أسودين. صُمم مقياس ليجو لتكون أقصى درجة حساسية له في نطاق التردد ما بين ١٠٠و٢٠٠ هرتز، حيث يبعث اندماج الثقوب السوداء أقوى إشاراته، وهذا هو أفضل نطاق للرصد؛ فعند ١٠٠٠ هرتز، تكون الحساسية أسوأ مرتين؛ لأن الضوضاء في الإلكترونيات تزداد، وعند ٢٠ هرتز تغدو الحساسية أسوأ بمقدار ١٠ أضعاف، حيث يزداد التشويش الجيولوجي الصادر عن الأرض.

ما المعلومات التي يمكننا الحصول عليها من تموجات الزمكان؟ دعنا نستخدم تشبيهًا بتموجات الماء، تخيَّل أنك قطعة فلين في بركة كبيرة في يوم يهبُّ فيه النسيم، ثم حرَّك الريح سطح الماء، يعد النمط العشوائي للموجات الذي يجعلك تتأرجح لأعلى وأسفل تشبيهًا جيدًا للضوضاء الخلفية في تجربة موجة الجاذبية. إذا ما شرع أحدهم في إلقاء الحجارة في البركة كل ثانية لبضع ثوانٍ، فستشعر بحركة تمايل إضافية دورية. هذا هو غناء ثقبين أسودين معًا. يعتمد حجم الحركة على حجم الحجر، وعلى مسافة وجودك من المكان الذي يسقط فيه الحجر؛ لأن التموجات تصبح أضعف أثناء انتقالها إلى الخارج. وكقطعة فلين، ليس لديك عينان وأذنان، لذلك كل ما تشعر به هو الحركة؛ فليس لديك أي فكرة عن مصدر الأمواج. ولكن إذا كنت تستطيع التحدُّث إلى قطعة فلين ثانية قريبة، فستحصل على مزيد من المعلومات. تنتقل التموجات في دوائر

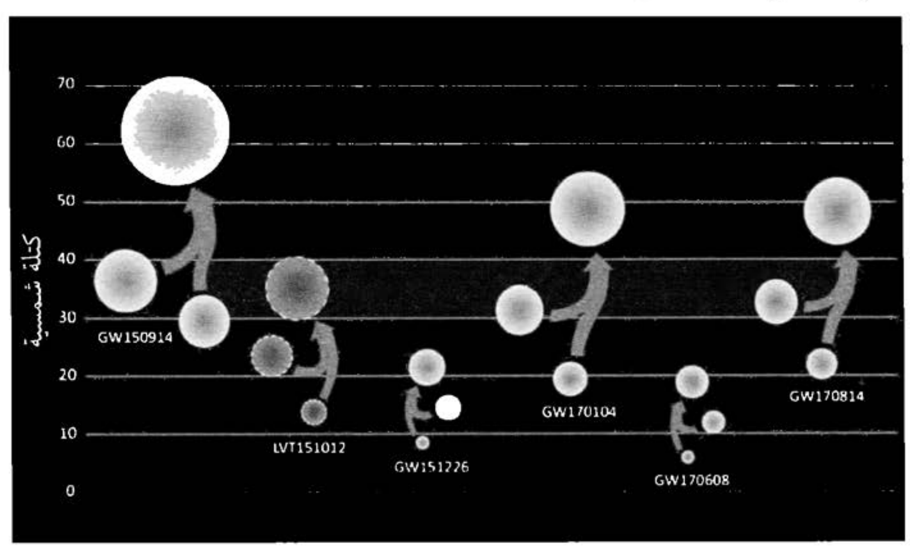
متحدة المركز؛ لذا يُعرِّفك توقيت تلقي الإشارتين اتجاه المصدر عن طريق التثليث، وهذه هي الطريقة التي تعمل بها أذناك لمعرفة الاتجاه الذي يصدر منه الصوت.

من خلال إحدى عمليات الرصد باستخدام مقياس ليجو، يستطيع الفيزيائيون معرفة عدة معلومات مهمة.[٤٠] حيث يمكن أن يتعرَّفوا من خلال نمط التردد المتغير كتلة الثقبين الأسودين بالمقارنة مع عملية محاكاة. تُستَخدم مرحلة الاندماج لقياس دوران الثقب الأسود الناتج بعد الاندماج. ويُقاس موضع الحدث عبر السماء باستخدام التأخير الزمني بين الإشارة التي تصل إلى جهازي الرصد (وتساعد حقيقة وجود إشارة مماثلة في كلا الموقعين على استبعاد الضوضاء أو أي مصدر زائف للإشارة). وبوجود موقعين فقط، لا يمكن تحديد الموضع في السماء بدقة شديدة؛ إذ يمكن أن يكون في أي مكان وسط رقعة شاسعة. ومع ذلك أدى نجاح مشروع ليجو إلى تنشيط المجتمع الدولي؛ إذ دشنت أوروبا للتو مقياس تداخل في إيطاليا (فيرجو)، وواحدًا آخر في ألمانيا ليس بعيدًا عنه («جي إي أوه ٦٠٠» (GEO600)). وسيتم تشغيل مقياس تداخل في اليابان في عام ٢٠١٩، ومن المقرر إنشاء مقياس آخر في الهند في أوائل العِقد القادم. ربما تسمح عمليات الرصد في ثلاثة مواقع أو أكثر بتحديد مصادر موجات الجاذبية إلى مصدر فلكي معين، وبالتالي يمكن رصده عبر الطيف الكهرومغناطيسي.[٤١]

تُقدَّر مسافة بُعد المصدر على حسب قوة الإشارة؛ فالأمواج تتحرك بعيدًا عن الثقب الأسود في ثلاثة أبعاد وتقل قوتها أثناء انتشارها عبر الفضاء. تتمتع موجات الجاذبية بميزة واحدة كبيرة عن الموجات الكهرومغناطيسية: يتناسب مداها عكسيًّا مع المسافة. إذا كان بُعد الثقب الأسود أكبر بعشرة أضعاف، تكون الإشارة أضعف بعشرة أضعاف. ولكن الفلكيين لا يستطيعون قياس مدى الموجة الكهرومغناطيسية؛ بل يقيسون شدتها، وهي تساوي مربع مداها، فإذا كان بُعد النجم أكبر بعشرة أضعاف، تكون شدة الضوء أضعف بمائة ضعف. لهذا السبب فإن مقياس ليجو، الذي يرصد موجات الجاذبية، له قدرة هائلة ويمكنه رصد طوفانها من على بُعد مليارات السنين الضوئية.

لكن ماذا لو كانت عملية رصد ليجو محض صدفة؟ فلا يمكنك استنباط إحصائيات من حدث واحد، هل سيكشف الكون عن أسراره في أغنية واحدة قصيرة؟ لقد كان الفيزيائيون مبتهجين، لكنهم كانوا قلقين أيضًا. إلا أنهم وجدوا عزاءً في كلمات أينشتاين في إحدى محاضراته التي ألقاها عام ١٩٢١ عندما بدا أن النسبية العامة قد دُحضت بالتجربة، إذ قال: «الرب بارع لكنه ليس شريرًا».

عندما أعلن فريق ليجو اكتشاف الحدث الثاني في ٢٦ ديسمبر ٢٠١٥، سرى في الجميع شعور بالإثارة مشوب بالارتياح، كانت الإشارة أضعف لأن المصدر كان أبعد قليلًا، إذ كان يقع على مسافة ١,٥ مليار سنة ضوئية، ولأن الثقبين الأسودين كانا أصغر حجمًا، ٩ و١٤ كتلة شمسية مقابل ٢٩ و٣٦ كتلة شمسية في الحدث الأول. ثم تمَّ تعيين حدث وسيط في ١٢ أكتوبر ٢٠١٥ كمرشح لأن يكون حدثًا بدلًا من اعتباره عملية رصد مؤكدة. كان هذا الحدث ضعيفًا لأن الثقبين الأسودين المشاركين فيه - ١٣ و٢٣ كتلة شمسية - قد اندمجا بعد وقت قصير من بدء الحياة على الأرض، على مسافة هائلة بلغت ٣,٣ مليار سنة ضوئية.[٤٢] وفي عام ٢٠١٧ قدم مشروع ليجو ثلاث عمليات رصد أخرى (شكل ٦١). ومع وجود خمس عمليات رصد مؤكدة وسادسة مشكوك فيها، غمر الفرح ألف عالِم، وتحول مشروع ليجو لنجاح باهر؛ حيث مثَّل فجر عصر علم فلك موجات الجاذبية.



شكل ٦١: الأحداث المرصودة من أول تشغيل علمي لمرصد «الموجات التثاقلية بمقياس التداخل الليزري المتقدم» (ليجو). تمت عملية الرصد الأولى في ١٤ سبتمبر ٢٠١٥، بعد أيام فقط من بدء المرصد في استقبال البيانات العلمية بعد فترة إغلاق طويلة. وتمت عمليتا رصد أخريان في عام ٢٠١٥، وتلتهما ثالثة في عام ٢٠١٧. ويعتبر الحدث الثاني (الدوائر المرسومة بخط متقطع) مرشحًا فقط لأن نسبة الإشارة إلى الضوضاء لم تصل عتبة عملية الرصد المؤكدة.

«مبادرة التعاون العلمي التابعة لمشروع ليجو»

وفي أغسطس من عام ٢٠١٧، رصد مقياس ليجو نبضة أخرى من موجات الجاذبية. ومع ذلك تضمن هذا الحدث اختلافين عن الأحداث المرصودة السابقة، كانت الإشارة أضعف وكان مصدرها على بُعد ١٣٠ مليون سنة ضوئية فقط، وهذا يعني أنها كانت ناتجة عن اندماج جرمين أقل ضخامة، نجمين نيوترونيين بدلًا من ثقبين أسودين.[٤٣] عمل مقياس ليجو إلى جانب مقياس تداخل فيرجو الأوروبي، ومكَّنت الإشارات المرصودة من قبل ثلاثة أجهزة رصد مختلفة العلماء من تحديد موجات الجاذبية بدقة غير مسبوقة، اصطدم النجمان النيوترونيان في مجرَّة تسمى «إن جي سي ٤٩٩٣» (NGC 4993)، وبدأت مراصد العالم أداء عملها.

كانت النتيجة كمية ضخمة من البيانات وولادة نوع جديد من علم الفلك، رصد قمران صناعيان تابعان لوكالة ناسا انفجارًا لأشعة جاما صادرًا عن اندماج نجمين نيوترونيين، ورصد أكثر من سبعين تلسكوبًا في جميع أنحاء العالم الوهج الضوئي والأشعة تحت الحمراء المتلاشية الناتجة عن هذا الاصطدام. وعلى عكس عمليات اندماج الثقوب السوداء، والتي لا تنتج أي إشعاع كهرومغناطيسي، تندمج النجوم النيوترونية بانفجار أقوى ١٠٠٠ مرة من المستعر الأعظم. تمثلت إحدى النتائج في انفجار الإشعاع، والأخرى في فيضان النيوترونات الذي أدى إلى سحابة من النفايات المشعَّة.[٤٤] وفي غضون يوم، توسعت السحابة من حجم مدينة إلى حجم النظام الشمسي، وخصبت النيوترونات النُوى الذريَّة وحولتها إلى عناصر أثقل. وقدَّر المُنظِّرون أن هذا الحدث صُنِعَ من الذهب ما يساوي ٢٠٠ كتلة أرضية، والتي تبلغ قيمتها حوالي ١٠[٣١] دولارات أمريكية إذا أمكنك إحضارها إلى الأرض! وأُطلق على مزيج موجات الجاذبية والحصاد الغني للمعلومات الكهرومغناطيسية اسم «علم الفلك متعدد الرسل» (multi-messenger astronomy). ومن المتوقع أن يشهد مرصدا ليجو وفيرجو عملية اندماج لنجمين نيوترونيين كل أسبوع، إلى جانب عملية اندماج ثقبين أسودين كل أسبوعين.[٤٥] إن الكون يفيض بتموجات الزمكان، وأخيرًا أصبح لدى الفلكيين عيون يمكن أن يروها بها.

تلت الجوائز هذه الاكتشافات سريعًا، غالبًا ما تطول الفترة الزمنية بين الاكتشاف ومنح جائزة نوبل. في الواقع، مات بعض العلماء البارزين أثناء الانتظار، ولا يمكن منح الجائزة بعد الوفاة، ولكن لم يكن هناك أدنى شك في أن رصد موجات الجاذبية سيلقى تقديرًا سريعًا. ومن ثمَّ لم يكن مفاجئًا أنه في أكتوبر ٢٠١٧ - أي بعد أقل من

عامين من إحساس ليجو بأولى ومضات الزمكان - مُنِحَ راينر فايس وكيب ثورن وباري باريش جائزة نوبل في الفيزياء.

تصادمات الثقوب السوداء الضخمة واندماجاتها

الآن وبعد رصد تموجات الزمكان، إليك ما يمكننا توقعه: يوجد مليار نجم نيوتروني و٣٠٠ مليون ثقب أسود في مجرَّة درب التبانة، وهم مرشحون كُثُر لعمليات الاندماج. مع ذلك، فإن احتمالات وجودها في أنظمة ثنائية قريبة منخفضة للغاية، وبالتالي فإن معدل اندماج ثقبين أسودين يساوي واحدًا كل ٥٠٠ ألف عام. يبدو هذا وقتًا طويلًا، ولكن حساسية مقياس ليجو تمنحه قدرة هائلة عبر الكون، وعندما تعود مرحلة ليجو المتقدمة للعمل في عام ٢٠٢٠، ستكون حساسيتها أكبر بثلاث مرات، ممَّا يعني أنها تستطيع رصد الإشارة نفسها من على مسافة تزيد عن إصداره السابق بثلاثة أضعافها، وستقيس الإزاحة بمستوى لا يُصدَّق يبلغ جزءًا واحدًا من كل ١٠^٢٢ أجزاء. وبما أن الحجم يتناسب مع مكعب المسافة، فإن عدد الأهداف سيتضاعف ثلاثين ضعفًا، ويمكن أن يصل معدل الأحداث إلى ١٠٠٠ في السنة، أو حدثين كل يوم.[٤٦]

سيتمثل الأسلوب التالي في دراسة موجات الجاذبية التي تنبعث عندما يبتلع الثقب الأسود فائق الضخامة الموجود في مركز المجرَّة، جرمًا مضغوطًا كنجم نيوتروني أو ثقبًا أسودَ. وبالعودة إلى تشبيه الصوت، كلما زاد حجم الثقبين الأسودين، زاد الوقت المداري عند اندماجهما وانخفض تردد الأغنية المميزة. يُنتِج الجرم فائق الضخامة «أصواتٍ» في مدى تردد يتراوح بين ١٠^-٤ هرتز إلى ١ هرتز، ووقت مداري من ساعات إلى ثوانٍ، وستكون الإشارات المنبعثة من الثقب الأسود فائق الضخامة تحت نطاق السمع البشري، أقل حتى من أنبوب آلة الأرغن الأكثر انخفاضًا، تُحَسُّ هذه الأصوات أكثر ممَّا تُسمَع.

نظرًا لأن نطاق التردد الخاص به منخفض جدًّا، يجب أن يكون جهاز الرصد موجودًا في بيئة الفضاء الأصلية؛ من أجل تسجيل موجات الجاذبية المنبعثة من الثقوب السوداء الأكثر ضخامة. وهذا الجهاز المقترح لهذه المهمة هو «ليزا» (LISA)، أو «هوائي مقياس التداخل الليزري الفضائي». سيتكون هذا الهوائي من مجموعة من ثلاثة أقمار صناعية مرتبة في مثلث متساوي الأضلاع، طول ضلعه مليون كيلومتر.[٤٧]

هذه المجموعة سيكون حجمها ١٠ أضعاف حجم مدار القمر، وسوف تدور حول الشمس عند المسافة نفسها مع الأرض، ولكن تتأخر عن الأرض بعشرين درجة. أحد هذه الأقمار الصناعية سيكون القمر «الرئيس» وسيحتوي على الليزر وأجهزة الرصد، والآخران قمران «تابعان» يحتويان عاكسات مُعلَّقة بكتل اختبار مصنوعة من سبيكة من الذهب والبلاتين. صُمِّمَ هذ الهوائي لقياس انزياح أصغر من حجم الذرة على مسافة مليون كيلومتر، أو بدقة تبلغ جزءًا واحدًا من ١٠^٢١ أجزاء. ولرصد تموجات الزمكان الضئيلة يجب تحصين كتل الاختبار من أي قوة أخرى غير الجاذبية، كما لو أنها ليست جزءًا من مركبة فضائية، وأنها ببساطة في «سقوط حر» عبر مدارها حول الأرض/الشمس. هذا التحدي الهندسي يتطلب سيطرة شديدة على المركبة الفضائية. ينبغي أن تطفو كل مركبة فضائية حول كتلة الاختبار الموجودة فيها، وذلك باستخدام مستشعرات سعوية لتحديد موقعها بالنسبة للكتلة، وأجهزة دفع دقيقة لإبقاء تلك الكتلة في المركز على نحو شديد الدقة. وفي عام ٢٠١٦ قامت بعثة اختبار من وكالة الفضاء الأوروبية تحت مسمى «ليزا باثفايندر» (LISA Pathfinder) بعرض هذه التكنولوجيا بنجاح. أدى نجاح ليجو إلى التزام نحو تمويل هذا المشروع في عام ٢٠١٧، واحتمالات نجاح مبهرة لمشروع ليزا.[٤٨]

في النموذج القياسي لعلم الكونيات تتشكل البنى هرميًا من خلال اندماج الأجرام الصغيرة وتراكم المادة المحيطة، حيث تندمج المجرّات القزمة لتشكل مجرّات كبيرة، وتواصل المجرّات الكبيرة نموًّا من خلال الاندماج مع المجرّات القزمة الأكثر وفرة، وسقوط الغاز فيها من الفضاء بين المجرّات. وتتبع الثقوب السوداء المركزية عملية نمو مماثلة، ولكن من الصعب التنبؤ بالتفاصيل لأنها تعتمد على عملية تراكم معقدة وعلى الظروف الخاصة في مراكز المجرّات.[٤٩]

تحدث عمليات الاندماج بين الثقوب السوداء فائقة الضخامة على فترات زمنية أطول وتنبعث منها موجات جاذبية ذات تردد منخفض، وتشير عمليات الحساب التقريبية إلى أنه في حالة اندماج ثقبين أسودين كتلة كلٍّ منهما تساوي مليون كتلة شمسية، فإنهما سيصدران موجات جاذبية بتردد يبلغ ١٠^-٣ هرتز وفترة زمنية تبلغ ساعة، في حين أن عملية اندماج ثقبين أسودين كتلة كلٍّ منهما مليار كتلة شمسية تنبعث منها موجات جاذبية بتردد ١٠^-٩ هرتز وفترة زمنية تبلغ عشرات السنين. ويتطلب التقاط موجة تستغرق سنوات عديدة للمرور عبر جهاز الرصد ثباتًا استثنائيًا. وتشير عمليات

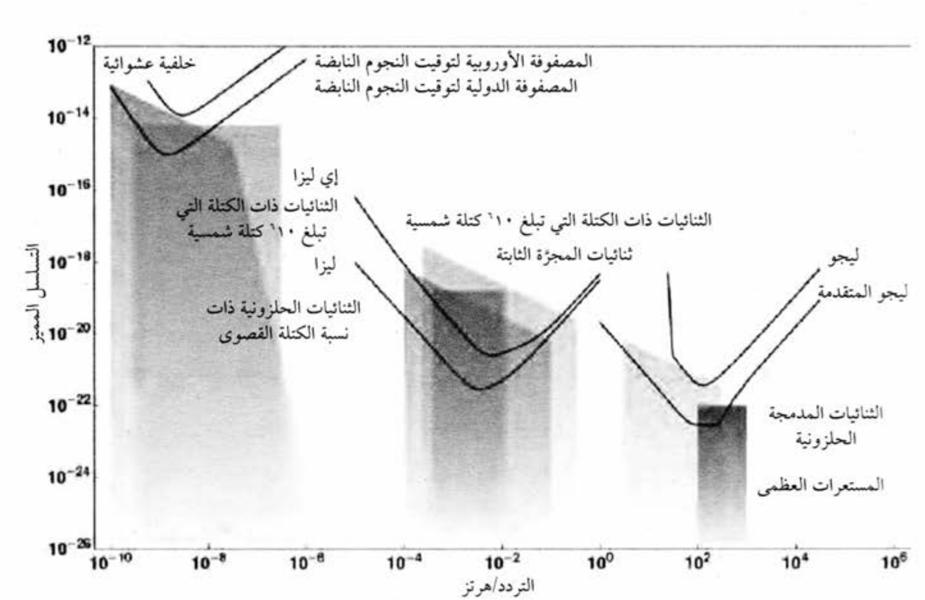
المحاكاة التفصيلية باستخدام أجهزة الكمبيوتر إلى أن مقياس ليزا سيرصد بضع عمليات اندماج في السنة، عادة من الأحداث التي تكون فيها كتلة الثقبين الأسودين في حدود ١٠^٦ إلى ١٠^٧ كتلة شمسية.[٥٠] وتشكيلة العينات هذه سوف تمنحنا فكرة حول المراحل الأولى للثقوب السوداء وتجمُّع المجرَّات.

ومع ذلك، فإن أصخب الأحداث وأكثر عمليات الاندماج إثارة بين الثقوب السوداء التي تبلغ كتلتها مليار كتلة شمسية تحدث بترددات منخفضة للغاية خارج نطاق قدرات ليزا. للعثور على موجات الجاذبية هذه، فإن المصفوفة التي تمتد على مسافة مليون كيلومتر ليست كبيرة بما يكفي؛ إذ يتطلب ذلك أداة بحجم مجرَّة. وهنا يبرز دور المصفوفات المخصصة لرصد توقيت النجوم النابضة. النجوم النابضة نجوم منضغطة ميتة مكونة من نيوترونات فقط. وتظهر النقاط الساخنة على أسطحها عبر التلسكوبات الراديوية أثناء دورانها، وتحافظ النبضات الراديوية على توقيت مثالي، وتعد النجوم النابضة التي تدور مئات الدورات في الثانية الساعات الأكثر دقة في الكون.

على بُعد مليارات السنوات الضوئية، يوجد ثقبان أسودان فائقا الضخامة يرقصان برويَّة رقصة تدوم ملايين السنين، وعندما يقعان أخيرًا بين ذراعي أحدهما الآخر ويندمجان، يغمران الكون بموجات الجاذبية منخفضة التردد التي تمد وتضغط نسيج الزمكان. ومثلنا على الأرض، تهتز النجوم النابضة لأعلى وأسفل أثناء مرور الموجات عبرها بسرعة الضوء. تغير الموجات قليلًا من توقيت النبضات. على سبيل المثال، قد تتسبب الموجة التي ترددها ١٠^-٨ هرتز، أو دورة واحدة في أربعة أشهر، في وصول النبضات مبكرة بفترة تبلغ ١٠ نانو ثانية في يناير، ومتأخرة بفترة تبلغ ١٠ نانو ثانية في مارس. هذه تجربة حساسة للغاية، لكن التلسكوبات الراديوية الحالية تستطيع قياس النبضات بالدقة المطلوبة. وتستخدم المصفوفات المخصصة لرصد توقيت النجوم النابضة من أجل زيادة حساسية التجربة وتوفير بعض الحساسية الاتجاهية.[٥١]

تعد المصفوفات المخصصة لرصد توقيت النجوم النابضة هي أعظم تجربة ابتكرها العلماء على الإطلاق؛ فبدلًا من مقياس ليجو الممتد لأربعة كيلومترات أو مقياس ليزا الممتد لمليون كيلومتر، تنتشر راصدات النجوم النابضة على مدى آلاف تريليونات الكيلومترات. فمجرَّة درب التبانة هي جهاز الرصد، وهذا هو العلم الرائع حقًّا. ثمة أربع مصفوفات تبحث بنشاط عن الإشارات، وتجمع بياناتها في مصفوفة دولية. وبينما تضيف نجومًا نابضة إلى قوائم أهدافها وتزيد من حساسيتها، ثمة فرصة

بنسبة ٨٠٪ أن تكتشف واحدة أو أكثر من هذه التجارب عملية اندماج ثقبين أسودين فائقي الضخامة خلال العِقد المقبل (شكل ٦٢).[٥٢]



شكل ٦٢: مقارنة بين الأنواع المختلفة لأجهزة رصد موجات الجاذبية وأنظمتها. إلى اليمين، عند الترددات العالية، توجد منحنيات حساسية لمقاييس التداخل مثل ليجو، والتي تعتبر حساسة لعمليات اندماج ثنائيات المستعرات العظمى والنجوم النيوترونية المدمجة والثقوب السوداء. وفي الوسط توجد مقاييس التداخل الفضائية مثل ليزا، والتي ترصد الأحداث ذات التردد المنخفض مثل عمليات اندماج ثنائيات الثقوب السوداء الضخمة. وعلى اليسار توجد المصفوفات المخصصة لرصد توقيت النجوم النابضة التي ترصد الأحداث ذات أقل الترددات، مثل عمليات اندماج الثقوب السوداء فائقة الضخامة والخلفية العشوائية من الانفجار العظيم.
«سي مور، آر كول، وبي بيري، دورية «كلاسيكال أند كوانتم جرافيتي»، المجلد ٣٢/ معهد الفيزياء»

الجاذبية والانفجار العظيم

الحدود المتطرفة هي اكتشاف موجات الجاذبية البدائية، تذكَّر أن تموجات الزمكان تنشأ في أي وقت تغير فيه الكتلة تكوينها، وبالطبع حدثت التغيرات الأكثر دراماتيكية في الكتلة في بداية الكون، عندما كانت المادة التي ستشكل في النهاية مئات

المليارات من المجرَّات موجودة في مساحة أصغر من الذرَّة. يشمل علم الكونيات الحالي مرحلة مبكرة تسمى التضخم؛ وهي زيادة أُسيَّة في حجم الكون عندما كان لا يزال مجهريًّا، بعد ١٠$^{-٣٥}$ ثانية من الانفجار العظيم، يتم الاحتجاج بالتضخم لشرح التوازن والسلاسة الغامضين للكون.[٥٣] ويعني التضخم أن «بذور» المجرَّات كانت في الأساس تموجات كمومية.

هناك بعض الدعم غير المباشر للتضخم، ولكن الطاقة في ذلك الوقت كانت أكبر بتريليونات المرات ممَّا يمكن الوصول إليه في المختبر أو في مُعجِّلات الجسيمات، مثل مصادم الجزيئات الكبير، ومن ثمَّ لا يمكننا محاولة تكرارها في تجربة أرضية. إن اختبار التضخم مهم؛ لأنه سيقربنا من «الجائزة الكبرى» المتمثلة في نظرية الجاذبية الكمومية، لا بد أن موجات الجاذبية الناتجة عن التضخم ما تزال تتردد في الكون، فطاقتها تنتشر عبر ترددات تبلغ ٢٩ قوة أُسيَّة للعشرة، وتشمل جميع طرق الرصد التي ناقشناها.[٥٤] ومع ذلك فإن الأمواج ضعيفة للغاية بحيث لا يمكن قياسها بمقاييس التداخل أو المصفوفات المخصصة لرصد توقيت النجوم النابضة؛ لذا فقد ركز علماء الفلك على بصماتها على الإشعاع الذي غمر الكون أثناء انخفاض درجة حرارته بدرجة كافية لتكوين ذرات مستقرة، يسافر هذا الإشعاع دون تغيير عبر الكون منذ ٤٠٠ ألف سنة بعد الانفجار العظيم، ونحن نرصده في صورة موجات ميكروويف، ويُتوقع أن تؤدي إطالة وضغط الفضاء إلى ترك نمط طفيف في إشعاع الميكروويف.[٥٥]

اجتاحت الحماسة المجتمع العلمي عام ٢٠١٤ عندما زعم فريق يعمل في تلسكوب القطب الجنوبي أنه رصد موجات الجاذبية الناجمة عن التضخم، ليس بشكل مباشر، ولكن عن طريق استنباطها من بصماتها الخاصة على الإشعاع.[٥٦] وتلاشت الإثارة بعد بضعة أشهر عندما اتضح أن الفريق قد خُدع بسبب إشارة ملوثة من الغبار الموجود في درب التبانة. كانت تجربة مؤلمة للباحثين، حيث قاموا بالتحقق من البيانات بعناية ولكنهم خُدِعوا بسبب واجهة خفيَّة، تمامًا عندما تكون عدسات نظارتك مشبَّرة فتعتقد خطأً أن هناك عاصفة بعيدة آتية، إن الكون مكان فوضوي مُعقَّد لا يمكن التحكم فيه مثل معدات المختبرات؛ لذلك فمن الحكمة أن يكون علماء الكونيات حذرين. ومع ذلك، عندما تكون هناك منافسة من مجموعات أخرى، تصعب مقاومة الرغبة في نشر الأبحاث سريعًا.

يستعد عدد من الفرق لمحاولات جديدة في هذا الرصد المهم، أفضل المواقع لعمليات الرصد الصعبة هذه والمليئة بالتحديات تقع بالقرب من القطب الجنوبي وفي صحراء أتاكاما العالية والجافة في تشيلي. ويشارك في هذه العمليات خمس فرق، والمخاطر هناك عالية، فلو لم تُرصد آثار موجات الجاذبية، فإن جزءًا رئيسيًّا في علم الكونيات سيكون موضع شك، ولكن إذا تم رصد هذه الآثار، فستكون دليلًا مباشرًا على الجاذبية الكمومية.

قد يكون الأصل الكمومي للكون علامة على أننا نعيش في أكوان متعددة، حيث نسكن واحدة من عدد لا حصر له من فقاعات الزمكان. وكل كون في الأكوان المتعددة يمثل زمكانًا مميزًا، وربما لا يمكن رصده من زمكاننا، ممَّا يجعل اختبار هذه الفكرة صعبًا. وربما يمتلك كلٌّ منها قوانين فيزيائية مختلفة، وربما حتى تكون مختلفة على نحو غير معروف عن كوننا. هل هذه الأكوان الأخرى تحتوي على القوى الأساسية ذاتها؟ هل تحتوي على ثقوب سوداء؟ هل تحتوي على أشكال حياة يمكنها فهم كونها؟ هذه بعض الأسئلة التي لا يمكن إجابتها عند أقصى حدود علم الكونيات.



الفصل الثامن

مصير الثقوب السوداء

يمثل مستقبل الثقوب السوداء قصة نمو قصير المدى وتبخر طويل المدى، قد يشهد أحفادنا في المستقبل البعيد مركز مجرَّتنا يشتعل ككوازار، واندماج الثقبين الأسودين فائقي الضخامة في مجرَّتنا ومجرَّة أندروميدا. وفي النهاية ستصل الثقوب السوداء إلى الحد الأقصى للحجم، ولن تنشأ ثقوب سوداء جديدة. ويمكن أن تستمر الحياة في الكون حتى في عصر الظلام الدامس الذي سيحلُّ في المستقبل، ولكنها ستواجه تحديًا كبيرًا لتنتصر نصرًا أخيرًا على قوى التبديد والتدهور.

ومع ذلك، تمثل الثقوب السوداء حاليًّا الاختبار النهائي لأي نظرية جاذبية، لقد أدى السعي إلى التوفيق بين نظرية الكم والنسبية العامة إلى الجاذبية في زمكان متعدد الأبعاد. فالأبعاد الثلاثة المألوفة للفضاء تشير إلى أبعاد إضافية مخفيَّة، ويجب إدراج الثقوب السوداء في إطار العمل الجديد هذا.

عصر الجاذبية الجديد

ما سبب ضعف قوة الجاذبية؟ لا يبدو هذا سؤالًا منطقيًّا، خاصةً في يوم تجد فيه صعوبة في النهوض عن السرير، إلى أن تتذكر أن قطعة مغناطيس صغيرة تستطيع أن تحمل مشبك ورق في مواجهة قوة السحب الكبيرة لأسفل والتي تبعثها الأرض كلها. الجاذبية أضعف بكثير من القوى الأساسية الثلاث الأخرى، ومحاولة شرح هذه الحقيقة البسيطة تأخذنا إلى نطاق خفي من الأبعاد الخفية والأكوان المتعددة.

وكما رأينا، فإن الفيزيائيين لديهم بالفعل أدلة على أن القوى الأساسية الأربع قد تتجسد في صورة قوة عظمى وحيدة في درجات حرارة أو طاقات مرتفعة بما فيه الكفاية، وقد شوهد توحيد اثنين من القوى الأربع في معجِّلات الجسيمات في سبعينيات القرن العشرين، ممَّا أدى إلى منح مجموعة من جوائز نوبل. متابعة هذا المسار أدت

إلى فكرة التناظر الفائق، في عالمنا العادي لا تتفاعل الجسيمات ذات اللف المغزلي النصفي، مثل الإلكترونات والكواركات (يُطلق عليها فئة الفرميونات)، مع الجسيمات ذات اللف المغزلي الصحيح والتي تحمل قوى، مثل الفوتونات والجلونات (يُطلق عليها فئة البوزونات).[١] وبالنسبة للجسيمات دون الذريَّة، اللف المغزلي سمة رياضية خاصة لا تشبه مباشرة اللف المغزلي للأجسام فوق الذريَّة أو الكواكب. والفرميونات والبوزونات هي جسيمات منفصلة تمامًا كما الزيت والماء. ويوحِّد التناظر الفائق هاتين الفئتين من خلال التنبؤ بمجموعة من جسيمات «الظل» لكل فرميون وبوزون، كما يتوقع أن تندمج جميع القوى باستثناء الجاذبية في قوة واحدة عند درجة حرارة هائلة تبلغ $١٠^{٢٩}$ كلفن. لجأ المُنظِّرون إلى التناظر الفائق من أجل السعي وراء حلمهم بالتوحيد الكامن وراء عدد كبير من الجسيمات المختلفة دون الذرية. ولكن واجه التناظر الفائق شكوكًا؛ لأنه لم تُرى أي إشارة على جسيمات الظل هذه في مصادم الجزيئات الكبير.

ظهر هجوم ثانٍ على التوحيد في ثمانينيات القرن العشرين من خلال نظرية الأوتار، تعالج نظرية الأوتار مشاكل النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات من خلال افتراض أن الجسيمات ليست أساسية ولكنها أنماط تذبذب لكيانات صغيرة أحادية البعد تسمى الأوتار. انتشر الحماس لنظرية الأوتار في مجتمع الفيزياء النظرية كالنار في الهشيم، لقد استندت هذه النظرية إلى عمليات رياضية منظمة جدًّا ووحدت الجاذبية طبيعيًّا مع القوى الثلاث الأخرى. ومع ذلك، بعد أكثر من عِقد من البحث المكثَّف، أصيب العديد من علماء الفيزياء بالإحباط تجاه نظرية الأوتار. كانت العمليات الرياضية صعبة وغالبًا ما تكون مستعصية على الحل، وقد تطلَّب الأمر أن يكون للزمكان تسعة أبعاد، ومن هنا يبدو أنه يوجد خمسة أبعاد إضافية! وفي نظرية الأوتار، لا تُدرك الأبعاد «الخفيَّة» إلا عند درجة حرارة مرتفعة للغاية تبلغ $١٠^{٣٢}$ كلفن أو بمقياس ضئيل للغاية يبلغ $١٠^{-٣٥}$ أمتار. لقد بدا الأمر كما لو كانت النظرية غير قابلة للاختبار.[٢]

ثم جاءت ليزا راندال. عندما كانت شابة يافعة، انجذبت إلى الرياضيات لأنها كانت تقدم إجابات نهائية، كانت أول فتاة قائدة لفريق الرياضيات في مدرستها وزميلة للعالم براين جرين، ذلك العالم البارز المتخصص في نظرية الأوتار في مدرسة ستيفيسانت الثانوية في نيويورك، وعندما كانت في الثامنة عشرة من عمرها فازت في مسابقة البحث عن المواهب في وستنجهاوس بمشروع عن أعداد جاوس الصحيحة. وبعد حصولها

على درجة الدكتوراه من جامعة هارفارد، انتقلت إلى الضفة الثانية للنهر إلى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا كأستاذ مساعد وأصبحت نجمة صاعدة في الفيزياء النظرية.

لليزا راندال تأملات في الموسيقى كما في الرياضيات، لا نجد لدينا الكثير من الأوبرات المستوحاة من الفيزياء النظرية، وحتى عُشَّاق الأوبرا قد يستغرقون وقتًا طويلًا قبل أن يتذكروا مقطوعة فيليب جاس «أينشتاين على الشاطئ». أضافت ليزا راندال إلى هذا العمل الفني الصغير مقدمة موسيقية سُميَت «أوبرا إسقاطية في سبعة فضاءات»، حيث ألَّف الملحن الإسباني هيكتور بارا الموسيقى وكتبت راندال الكلمات.

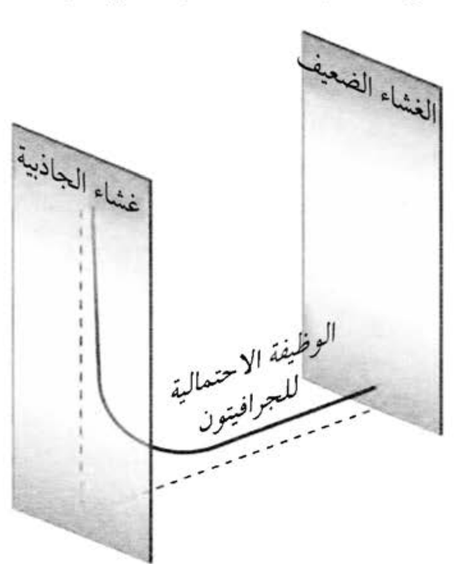
لندرك السبب في كون ليزا راندال قد ألهمت التفكير الإبداعي في الجاذبية، دعنا نعد إلى المشكلة المعقدة المتمثلة في المتفردة. وفقًا للنسبية العامة، فإن كل ثقب أسود يحتوي على متفردة، وهي المكان الذي يكون فيه انحناء الزمكان غير محدود.[٣] داخل الثقب الأسود تفشل معادلات أينشتاين، وتتنبأ بشيء لا معنى له فيزيائيًا، أوضح ستيفن هوكينج أن المتفردة حتمية في الثقب الأسود، وقد صاغ هذه المشكلة على نحو دراماتيكي عندما قال إن النسبية العامة تحتوي على بذور تدميرها.

أحد المسارات المحتمَلَة للخروج من هذا المأزق يتضمن نظرية الأوتار، فنظرية الأوتار مدفوعة بعدد من المسائل في الفيزياء الأساسية، تتمثل إحداها في توحيد قوى الطبيعة في إطار واحد. لا تتفق النظرية «السلسة» للزمكان المنحني مع النظرية «الخشنة» للجسيمات دون الذريَّة. وهذا هو أساس السعي وراء الجاذبية الكمومية الذي أحبط أينشتاين لعقود. وكذلك أيضًا يعد النموذج القياسي الناجح عمومًا لفيزياء الجسيمات معيبًا، للإلكترونات حجم صفر في النموذج؛ لذلك يجب أن تكون لها كثافة كتلة لا نهائية وكثافة شحنة لا نهائية، وهذا مثال آخر على التفرد الذي ينتهك قوانين الفيزياء. ولا يوجد حاليًا أي تفسير لسبب وجود العديد من الجزيئات الأساسية ذات الكتل المختلفة، أو سبب هيمنة المادة على المادة المضادة، أو السبب في كون المادة المظلمة والطاقة المظلمة هما المكونان الرئيسيان للكون.[٤]

عرفت راندال أن الأبحاث التي أُجريت حول نظرية الأوتار في تسعينيات القرن العشرين قد درست ثراء الأغشية؛ «الغشاء» عبارة عن كائن ذي أبعاد أقل في فضاء ذي أبعاد أكثر. فكِّر في ورقة، وهي كائن ثنائي الأبعاد ضمن فضاء ثلاثي الأبعاد، والنمل الذي يزحف على الورقة مقيَّد بالتحرك في بُعدين؛ فهو غير مدرك للبعد الثالث. ربما توجد أيضًا ورقة أخرى عليها نمل يزحف، ولن تكون هذه النملات مدركة لوجود

«الكون» الموازي الموجود بالقرب منها في البعد الثالث. وعلى نحو مماثل، ربما يكون كوننا غشاءً، جزيرة من ثلاثة أبعاد تطفو في بحر ذي أبعاد أكثر. الجسيمات مقصورة على الغشاء، لكن راندال كانت تعلم أن الجاذبية لن تقتصر على الغشاء؛ لأن النسبية العامة تقول إنها يجب أن تكون موجودة في هندسة الفضاء الكاملة. أدركت أن هذا قد يفسر سبب ضعف الجاذبية.

قاومت راندال فكرة الأبعاد الإضافية لسنوات، لكنها تعاونت في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا مع رامان ساندرم من جامعة بوسطن، من أجل توليد أفكار بشأن الأغشية. وصفت المعادلات الرياضية التي توصلا إليها زوجًا من الأكوان، أغشية ثلاثية الأبعاد، مفصولة بشكل رقيق بفضاء خماسي الأبعاد. ووجدا أن الفضاء بين الأغشية كان منحنيًا وأن هذا الانحناء يمكن أن يُضخم الأشياء أو القوى بين الأغشية أو يصغِّرها. ومن ثمَّ يمكن أن تكون الجاذبية قوية مثل القوى الأخرى في أحد الأغشية،



شكل ٦٣: أحد التفسيرات المحتملة لضعف قوة الجاذبية ينصُّ على وجود الأغشية والتي هي أجسام ذات أبعاد أقل، مُضمَّنة في فضاء ذي أبعاد أكثر. ربما تكون الجاذبية قوية في أحد الأغشية وتكون ضعيفة في غشاء آخر، حيث يكون كلاهما عبارة عن فضاء ثلاثي الأبعاد مُضمَّن في فضاء خماسي الأبعاد. وليس واضحًا بعد ما إذا كان من الممكن رصد الأبعاد الأكثر أو الأغشية المجاورة في المختبرات أو مُعجِّلات الجسيمات.

«كريس إمبي»

ولكن إذا حدث أن كنا في غشاء آخر، فإننا سنجد الجاذبية ضعيفة للغاية (شكل ٦٣). ثم صُعق راندال وساندرم بإدراك آخر: يمكن أن يكون هذا البعد الخامس لا نهائيًا ولن نكون على علم به. وحتى الآن، افترض الفيزيائيون منطقية نظرية الأوتار، من خلال كون أن الأبعاد الإضافية ملفوفة بإحكام بحيث لا يمكن لأي تجربة كشفها، أما في نظرية راندال وساندرم، يمكن رصدها بواسطة مُعجِّلات الجسيمات.[٥]

جعلهما هذا العمل نجمين؛ إذ حصل ساندرم على سبعة عروض عمل، وأخذ يتفكر في هذا الحظ السعيد الذي حالفهما بالنظر إلى مدى قلقهما بشأن أفكارهما: «لقد كان حساب ذلك مذهلًا، كانت لدينا جميع أسباب الشعور بالرعب. ففي كل مرحلة من هذه المراحل، شعرنا بخوف شديد من أن نظهر كالحمقى». وأصبحت راندال أول أستاذ ثابت في الفيزياء النظرية في تاريخ جامعة هارفارد العريقة، وانخرطت في تأليف الكتب المبسَّطة،[٦] وأخذت تتلقى دعوات بشكل منتظم - على نحو لم يكن يريحها - لإلقاء محاضرات حول النساء في مجال العلوم. وعن ذلك قالت بنبرة تهكم: «أحب أن أحل المشاكل البسيطة مثل وجود أبعاد إضافية في الفضاء. فالجميع يعتقد أن وجود المرأة في عالم العلوم مسألة أبسط، لكنها أكثر تعقيدًا بكثير».[٧]

الأغشية وثيقة الصلة بالثقوب السوداء، فكما رأينا في الفصل الأول استخدم سترومنجر وفافا نظرية الأوتار لإعادة إنتاج إنتروبيا الثقب الأسود وإشعاعه الذي استنتجه ستيفن هوكينج باستخدام الفيزياء الكلاسيكية. من خلال انحناء الأغشية حول مناطق ملفوفة بإحكام من الزمكان، أوضح المُنظِّرون أن بإمكانهم حساب الكتلة والشحنة الكهربائية للمنطقة الداخلية من الثقب الأسود. إن حقيقة كون العمليات الرياضية البحتة، المطورة لسبب مختلف تمامًا، يمكن استخدامها لحساب خواص «أشياء حقيقية» مثل الثقوب السوداء، كانت تعتبر انتصارًا لنظرية الأوتار.

ربما كنا نعيش في فقاعة ثلاثية الأبعاد تطفو في بحر من الأغشية خماسية أو سداسية أو سباعية الأبعاد أو أكثر من ذلك.[٨] كل هذا المزيج في بنية تسمى «الكون المتعدد». وهذا يختلف عن الأكوان المتعددة الموصوفة في نهاية الفصل السابق، والتي تعتمد على زمكانات أخرى قد نشأت من حالات فراغ كميٍّ موجودة إلى جانب الانفجار الكبير، الكون المتعدد في نظرية الأوتار هو مجموعة من الفضاءات متعددة الأبعاد المبهمة التي توجد مع الكون الذي نعيش فيه.

لم تُرصد أبعاد أكثر حتى الآن في المختبرات أو مع مُعجِّلات الجسيمات، ويعتقد العديد من علماء الفيزياء أن الأغشية - على غرار الأوتار - عبارة عن بنى رياضية ذكية لا علاقة لها بالواقع، وفي بعض الأوساط تحولت الشكوك الصحية إلى رد فعل عنيف. ومع ذلك لا تزال راندال متفائلة؛ إذ تواصل خبيرة الجاذبية عملها على الشواطئ الهائجة للرياضيات العليا. دعنا نترك الكلمة الأخيرة لشاعر وليس فيزيائيًّا، وهو إي إي كامينجز الذي قال: «اسمع: يوجد كون جيد مجاور، دعنا نذهب».[٩]

كوازار على عتبة بابنا

تعد الثقوب السوداء نهاية طريق التطور؛ فهي بالنسبة لنجم ضخم تمثل النتيجة التي فيها لا يمكن توليد طاقة وتنتصر فيها الجاذبية. والثقوب السوداء فائقة الضخامة الموجودة في مراكز المجرَّات هي أعمق حفر الجاذبية في الكون، وسوف تواصل النمو بلا هوادة ولا يمكن تجويعها إلى الأبد. إننا نشاهد عن كثب تطور أقرب ثقب أسود ضخم، الثقب الأسود الموجود في مجرَّتنا. هل من الممكن أن ننظر إلى الوراء إلى الوقت الذي بزغت فيه درب التبانة إلى الحياة، للتنبؤ بالوقت الذي قد تحترق فيه في المستقبل؟

إن انبعاثات الأشعة السينية هي أفضل مسبار للنشاط؛ لأنها يمكن أن تصل إلينا عبر الغاز والغبار الموجود في قرص المجرَّة، في حين ينطفأ الضوء المرئي. وفي السنوات العشرين التي كانت فيها تلسكوبات الأشعة السينية تراقب منطقة «القوس أ*» أو «الرامي أ*»، كانت هادئة للغاية في معظمها، ولكن تحدث توهجات كل بضعة أشهر تزيد من سطوعها بمعامل يتراوح ما بين ٥ و١٠ لمدة تقل عن ساعة.[١٠]

لكن ما سبق هو حصيلة عشرين سنة فقط من المراقبة، ومن الممكن رؤية تغييرات في تغذية الثقب الأسود على فترات زمنية تتجاوز حياة الإنسان. اكتُشِفَت بيانات مُجمَّعة من أربعة أقمار صناعية مختلفة «صدى» الأشعة السينية لوهج كبير يعود لـ ٣٠٠ عام مضت. في ذلك الوقت، سطعت منطقة «الرامي أ*» بمليون ضعف، ثم انعكس الإشعاع على سحابة جزيئية على بُعد بضعة مئات من السنين الضوئية من الثقب الأسود قبل وصوله إلى الأرض، وصل الإشعاع الأولي إلى الأرض على الأرجح في أوائل القرن الثامن عشر، وقت لم تتوافر أي تلسكوبات أشعة سينية لرصده، وقع الحدث نفسه قبل

٢٧ ألف سنة، عندما وصل أسلافنا الأوائل إلى شمال آسيا لأول مرة بعد مغادرتهم إفريقيا للمرة الأولى.[١١] حدث بهذه الدرجة من السطوع ربما ينطوي على ابتلاع الثقب الأسود لنجم.

ماذا عن الفترات الزمنية الأطول؟ هل يمكننا أن نرى ما الذي كان يقوم به الثقب الأسود الخامل في مركز مجرتنا منذ ملايين السنين؟ نعم، والقيام بذلك يحلُّ اللغز المرتبط بالكتلة الكلية لدرب التبانة. تزن مجرَّتنا تريليون ضعف وزن الشمس، ويمثل نحو ٨٥٪ من ذلك مادة مظلمة، وهي المادة الخفيَّة والغامضة التي تربط جميع المجرَّات معًا. يتبقى من هذا نحو ١٥٠ مليار كتلة شمسية من المادة الطبيعية. لسوء الحظ، عندما جمع علماء الفلك كتلة كل النجوم والغاز والغبار الذي يستطيعون رؤيتها، بلغت نصف هذه الكمية. ووجدوا المادة المفقودة بواسطة تلسكوب الأشعة السينية في شكل ضباب كثيف حار منتشر في المجرَّة. فقد رأوا «فقاعة» منخفضة الكثافة تمتد من مركز المجرَّة حتى ثلثي المسافة إلى الأرض، وحسبوا الطاقة اللازمة لإخلاء مثل هذه الفقاعة الكبيرة واستنتجوا أن مجرَّة درب التبانة لا بد وأنها قد مرت بمرحلة كوازار في الماضي.[١٢] تتحرك هذه الموجة الصادمة بسرعة ٢ مليون ميل في الساعة وسوف تصل إلينا خلال نحو ٣ ملايين سنة؛ لذلك ليس هناك سبب للذعر. إن تَتَبُّعها عبر ٢٠ ألف سنة ضوئية يعني أن مرحلة الكوازار بدأت قبل ٦ ملايين سنة، عندما سار الإنسان الأول على الأرض، ويتأكد هذا الخط الزمني بوجود نجوم عمرها ٦ ملايين سنة بالقرب من مركز المجرَّة، والتي ربما تكونت من مواد تدفقت نحو الثقب الأسود خلال مرحلة التغذية الأولى، دخل الثقب الأسود القابع في مجرَّة درب التبانة في نوبة تغذية منذ ٦ ملايين سنة، ثم تجشأ الكثير من الطاقة والغاز لدرجة أنه قد نفد منه الغذاء ودخل في حالة سبات.

ماذا يحمل المستقبل لمركز المجرَّة؟ إنه في حالة هادئة للغاية الآن، لكن هذا لن يستمر إلى الأبد، يمكننا أن نتوقع أن يشتعل الكوازار الواقف على عتبة بابنا كل بضع مئات من ملايين السنين. وتوجد دلائل تشير إلى أن مركز المجرَّة يلملم شتاته من أجل مرحلة نشطة أخرى. قدمت عمليات رصد الأشعة السينية أدلة على وجود سرب من ٢٠ ألف ثقب أسود ونجم نيوتروني على مسافة ٣ سنوات ضوئية من منطقة الرامي أ*.[١٣] ويعد هذا أعلى تركيز لمخلفات نجمية منضغطة في أي مكان في المجرَّة، وقد هاجرت إلى المركز على مدى عدة مليارات من السنين. لو كان لديك وعاء

يحتوي على كرات رخامية سوداء وكرات خشبية بالحجم نفسه ثم هززته، فإن الكرات الرخامية ستتجه إلى قاع الوعاء لأنها أثقل. وبالمثل، فإن تفاعلات الجاذبية ستجعل الثقوب السوداء تتركز على نحو أكثر مركزية من نظيراتها من النجوم الطبيعية التي تفوقها عددًا.

ومع ذلك، فإن احتمالات أن نشهد عودة نشاط الكوازار منخفضة للغاية، فبالنسبة لمجرَّة مثل مجرَّة درب التبانة، من المحتمل أن يسطع الثقب الأسود بمقدار مليار ضعف خلال ١٪ فقط من العمر المتبقي للشمس البالغ ٥ مليارات سنة.[١٤] آخر مرة كانت فيها درب التبانة كوازارًا عندما انفصل الشمبانزي والبشر على شجرة التطور، وربما تحدث المرة القادمة بعد عشرات الملايين من السنين في المستقبل.

لو ظللنا ضمن الأنواع الحية في المستقبل، فماذا سنرى حينها؟ لن نرى شيئًا واضحًا؛ إذ يوجد الكثير من الغبار بيننا وبين منطقة الرامي أ* لدرجة أنه سيحجب معظم الضوء المرئي، والنفاثتان الراديويتان ستنطلقان نحو السماء بزاوية قائمة بالنسبة إلى درب التبانة، ولكنهما لن تكونا مرئيتين للعين البشرية، وسيتدفق الإشعاع عالي الطاقة بشدة مسببًا ارتفاع معدلات التطفر. وما لم نتخذ مأوى دائمًا، فإن حمضنا النووي سيتمزق على نحو مطرد، ولكن إذا استطعنا أن نرتقي ١٠٠ سنة ضوئية عن قرص المجرَّة، فمن هذا المنظور سنستمتع بمنظر مهيب للثقب الأسود المتوهج؛ فسيضيء قرصه المزوِّد كالبدر التام.

الاندماج مع مجرَّة أندروميدا

إننا في مسار تصادمي مع أقرب جيراننا؛ فقبل أن تموت الشمس، ستقترب مجرَّتا درب التبانة وأندروميدا وتتفاعلان وتندمجان وسينتج عن هذا الاندماج عواقب على النظام الشمسي وسكانه لسنا واثقين من فداحتها، وسيكون اندماج الثقبين الأسودين في مركز كل مجرَّة أحد أكثر الأحداث المذهلة التي يمكن تخيلها.

عرفنا منذ قرن أن مجرَّة أندروميدا (M31) تقترب منا بسرعة ١٢٠ كيلومترًا في الثانية، أو ٢٧٠ ألف ميل في الساعة. تتباعد المجرَّات على نحو عام عنا بسبب توسع الكون، لكن درب التبانة وأندروميدا قريبتان بما فيه الكفاية بحيث تتغلب جاذبيتهما المتبادلة على التمدد الكوني. وتكشف قياسات تلسكوب هابل الفضائي لحركة

أندروميدا الجانبية عن أنها تتجه مباشرة تقريبًا نحونا.[15] وتبين المحاكاة أنه خلال مليارَي سنة ستجتاز المجرَّتان إحداهما الأخرى. وبينما تتباعدان، سوف يربطهما جسر شبحي من النجوم والغاز. حاليًا مجرَّة أندروميدا عبارة عن رقعة باهتة غامضة من الضوء، بالكاد مرئية للعين المجردة، ولكن بعد أربعة مليارات سنة من الآن، سوف تبدو أندروميدا ضخمة في سماء الليل لأي راءٍ يراها من على الأرض إذا ظلت على الأرض حياة وقتها (شكل ٦٤). وبعد نحو ٤٫٥ مليارات سنة من الآن، ستقترب المجرَّتان إحداهما من الأخرى مرة أخرى، وتنفذان بضع دورات ضيقة، ثم تندمجان. وعلى مدى المليار سنة التالية ستستقران في مجرَّة جديدة هادئة كبيرة: «ميلكوميدا» (Milkomeda).



شكل ٦٤: درب التبانة وأندروميدا في مسار تصادمي. تُظهر هذه الصورة سماء الأرض بعد نحو ٤ مليارات سنة من الآن، بعد أن تجتاز المجرَّتان إحداهما وتتقاربان للمرة الأخيرة، وستتشوه درب التبانة بسبب هذا التفاعل، وبعد اندماج المجرَّتين، سيندمج الثقبان الأسودان في مركز كل مجرَّة لإنتاج ثقب أسود جديد أكثر ضخامة.

«ناسا/ معهد علوم التلسكوب الفضائي»

كان من أطلق على هذه المجرَّة الافتراضية الجديدة اسمها هو أفي لويب من جامعة هارفارد، والذي عمل مع الباحث في مرحلة ما بعد الدكتوراه تي جيه كوكس في جامعة هارفارد على المحاكاة الحاسوبية لعملية الاندماج. وقد غيَّرا الافتراضات وشروط البدء، وفي كل مرة كان الأمر يستغرق أسبوعين على جهاز يعادل ٢٠ من

أجهزة الكمبيوتر المكتبية الحديث.[١٦] لا يشبه تصادم مجرَّتين حادث تصادم سيارتين؛ فالمجرَّات في الغالب تحتوي على مساحات فارغة؛ لذا فإن عددًا قليلًا جدًّا من النجوم يصطدم بغيره. وفي موقع الشمس، إذا كان حجم النجوم يساوي حجم كرات الجولف، فإنها تكون منفصلة بمقدار ١٠٠٠ كيلومتر، وحتى في وسط المجرَّة ستكون المسافة الفاصلة بينها ٣ أو ٤ كيلومترات. ستنقل الجاذبية النجوم على نحو كبير، ولكن أنظمتها الشمسية ستبقى كما هي؛ لذلك سيجد أبناء الأرض المستقبليين سماء ليل جديدة لأننا سنُنتَزَع من مدارنا الروتيني في قرص درب التبانة إلى موضع جديد.

ماذا سيحدث للأرض والنظام الشمسي عند وقوع حادث التصادم المجرِّي ذلك؟ ثمة احتمال بنسبة ١٠٪ أن تغوص الشمس في ذيل مجرّي بعد أول مرور قريب بين المجرتين. (يحدث الذيل المجرِّي عندما تقوم قوة جاذبية جرمين ضخمين ببعثرة مكوناتهما وتشويههما). وهذا من شأنه أن يعطينا نظرة من الأعلى على الأحداث اللاحقة، حتى إنه يوجد احتمال بنسبة ٣٪ أن «تسرق» مجرَّة أندروميدا الشمس من مجرَّة درب التبانة، وفي الاقتراب الثاني والأخير، ثمة احتمال بنسبة ٥٠٪ أن تتحرك الشمس نحو المنطقة الداخلية الكثيفة للمجرَّة الجديدة، واحتمال بنسبة ٥٠٪ أن تُلقَى بعيدًا، وسيراقب أحفادنا من بعيد كيف تمزج الجاذبية نتائج الاصطدام وتحوِّلها إلى مجرَّة هادئة.

يمثل كل هذا عرضًا جانبيًّا مسليًّا، أما الحدث الرئيسي، فهو اللقاء بين الثقب الأسود ذي الكتلة البالغة ٤ ملايين كتلة شمسية في مجرَّة درب التبانة، والثقب الأسود الأكبر بمقدار ٥٠ ضعفًا في أندروميدا.[١٧] سيتلاقى الثقبان الأسودان بالقرب من مركز ميلكوميدا، وسيتحركان إلى الداخل عبر نقل الطاقة إلى النجوم التي يقابلانها، وستُقذف بعض هذه النجوم خارج المجرَّة الجديدة تمامًا، وسيستغرق هذا نحو ١٠ ملايين سنة. وعندما يقتربان من بعضهما بمسافة سنة ضوئية، سيدخلان في دوامة الموت وسيطلقان تدفقًا شديدًا من موجات الجاذبية قبل الاندماج.[١٨]

سيكون الاندماج بين درب التبانة وأندروميدا حدثًا عاديًّا؛ فمثل هذه الأحداث يقع باستمرار في الكون، ومع انخفاض معدل الاندماج في ظل تمدد الكون، لا يزال كبيرًا. ولكن ليست كل عمليات الاندماج تتبع نمط الثقوب السوداء التي يقيسها مقياس ليجو. عندما تندمج الثقوب السوداء النجمية الثنائية ويصبح دورانها في اتجاه عكسي، يمكن أن تحمل موجات الجاذبية زخمًا كافيًا بحيث يواجه الزوج المندمج «ركلة»

ارتداد، وربما تكون قوة هذه الركلة كافية لقذف بقايا الاندماج، وأحيانًا تقوم مجرَّات مثل درب التبانة بقذف الثقوب السوداء في الفضاء الواقع بين المجرَّات، يمكن أن يحدث هذا أيضًا للثقوب السوداء فائقة الضخامة بعد اندماج مجرَّتين، من الرائع تخيُّل وجود ثقوب سوداء ضخمة ومنفردة تتحرك عبر الفضاء بين المجرَّات بسرعة تبلغ ملايين الأميال في الساعة.

لقد تم التعرُّف على نصف دزينة من الثقوب السوداء فائقة الضخامة، وعلمنا من الفصل السابق أن مقياس التداخل الفضائي ليزا مُصمَّم لرصد عمليات اندماج هذه الثنائيات، لكن لم تتطور الأدوات النظرية اللازمة لنمذجة عمليات الاندماج إلا منذ وقت قريب.[١٩] لن نضطر إلى الانتظار مليارات السنين للحصول على إشارة، كما هو الحال مع ميلكوميدا. يقع الكوازار «بي جي ١٣٠٢-١٠٢» (PG 1302-102) على بعد ٣,٥ مليارات سنة ضوئية، ويتضمن ثنائيًّا من الثقوب السوداء في مدار مدته خمس سنوات، ممَّا يشير إلى أن الثقبين الأسودين لا يفصل بينهما سوى شهر ضوئي. وهذا يعني أن دوامة الموت باتت وشيكة (رغم أنه بسبب طول الوقت الذي يستغرقه وصول المعلومات إلينا، قد حدثت تلك الدوامة بالفعل منذ ٣,٥ مليارات سنة). أما الحدث المنتظر الأكثر إثارة فهو وجود ثقبين أسودين على بُعد ١٠ مليارات سنة ضوئية، تبلغ كتلة كلٍّ منهما عدة مليارات كتلة شمسية.[٢٠] وتعني الفترة المدارية التي تستغرق سنة ونصف أن بينهما مسافة فاصلة تُقدَّر بستة أضعاف نصف قطر شفارتسشيلد، وبالتالي فإن هذا النظام قريب بما يكفي للاندماج بحيث يغمرنا بموجات الجاذبية. اندمج هذان الثقبان الأسودان بالفعل منذ مليارات السنين، لكن قد نضطر إلى الانتظار بضعة آلاف من السنين فقط لسماع أغنية الزمكان الخاصة بهما.

أكبر الثقوب السوداء في الكون

عند ذكر الثقوب السوداء فائقة الضخامة، يطرأ على الذهن جارجنتوا؛ وهو العنصر الأساسي المظلم في فيلم «بين النجوم»، يمثل جارجنتوا وجهة للمسافرين في الفضاء الذين يأملون في استخدام الثقب الدودي للوثب عبر الزمكان، تبلغ كتلة هذا الثقب ١٠٠ مليون ضعف لكتلة الشمس، ويبلغ حجم أفق حدثه حجم مدار الأرض، ويدور بسرعة ٩٩٪ من سرعة الضوء. وكما رأينا يعتبر جارجنتوا التصور الأكثر واقعية

للثقب الأسود في وسائل الإعلام الشعبية بفضل مساهمات كيب ثورن، الذي حرص على التأكد من أن الفيلم حقق التوازن بين العلم والفن.[٢١]

تبلغ كتلة جارجنتوا ٢٥ ضعفًا لكتلة الثقب الأسود الموجود في مركز درب التبانة، ولكنه يعتبر صغيرًا مقارنة بأكثر الثقوب السوداء ضخامة، حدد مسح سلون الرقمي للسماء موقع عشرة ثقوب سوداء تزيد كتلتها على ١٠ مليارات كتلة شمسية في الكون البعيد.[٢٢] ولا بد أنها التهمت موادًا على نحو سريع جدًّا لتنمو بمعامل مليون من كتلتها الأولية خلال ١,٥ مليار سنة فقط. هذه العمالقة تُقزِم حجم النظام الشمسي



شكل ٦٥: من المحتمل أن يكون الثقب الأسود في مركز المجرَّة القريبة «إن جي سي ١٢٧٧» (NGC 1277) هو الأكثر ضخامة على الإطلاق، حيث يبلغ نحو ١٧ مليار كتلة شمسية، رغم أن دراسة أخرى قاسته وقدَّرته بـ ٥ مليارات كتلة شمسية فقط. ويوضح هذا الرسم البياني حجم أفق الحدث مقارنة بالنظام الشمسي. تحتوي هذه المجرَّة على ثقب أسود أكبر بعشر مرات من معظم المجرَّات من حيث كتلته النجمية.

«دي بنينجفيلد/كيه جيبهارت/ستارديت»

(شكل ٦٥)، وحامل الرقم القياسي هو كوازار قوي الانبعاثات الراديوية يحتوي على ثقب أسود تبلغ كتلته ٤٠ مليار كتلة شمسية.[٢٣]

إن الفلكيين متعطشون للتوجُّه نحو الأرقام الكبيرة؛ لذلك دعنا نتوقف لنتأمل آثار وجود الثقوب السوداء متطرفة الكتلة. إن نصف قطر شفارتسشيلد للثقب الأسود ذي الكتلة البالغة ٤٠ مليار ضعف لكتلة الشمس يبلغ ٤ أيام ضوئية، وبالتالي فإن أفق الحدث يصل إلى ٢٠ ضعفًا لحجم النظام الشمسي متضمنًا بلوتو والكواكب القزمة الأخرى. ويدور الثقب الأسود بنسبة كبيرة من سرعة الضوء. ففي حين أن الكواكب الخارجية في نظامنا الشمسي تستغرق ٢٥٠ عامًا لإكمال مدارها، فإن هذا الجرم الأكبر بكثير يدور دورة كاملة كل ثلاثة أشهر. وعلى الرغم من أن كتلة المجرَّة الصغيرة تنضغط في حجم نظام شمسي، فإن متوسط الكثافة فيها أقل ١٠٠ مرة من الهواء الذي تتنفسه. ولا يبعث الثقب الأسود ضوءًا، ولكن القرص المزود المحيط به يضيء على نحو ساطع. إن ثقبًا أسود بهذه الكتلة في طور الكوازار النشط سينبعث منه ضوء يجعله ساطعًا بمائة تريليون ضعف لسطوع الشمس.

ما الذي ينتظر أكبر الثقوب السوداء في الكون؟ تنمو المجرَّات عن طريق تجميع الغاز من الأماكن الفارغة في الفضاء ومن خلال عمليات الاندماج، ولكن كلا مساري النمو هذين آخذين في تناقص. فكلما تمدد الكون، تتناقص إمدادات الغاز وتتباعد المجرَّات، ومن ثَمَّ يتناقص معدل الاندماج، وتوجد علاقة بين الكتلة النجمية للمجرَّة وكتلة ثقبها الأسود المركزي. تتراوح كتلة الثقوب السوداء ما بين ١٠^{٤} و١٠^{٥} كتل شمسية في العناقيد النجمية المغلقة، وحتى ١٠^{٦} إلى ١٠^{٧} كتل شمسية في مجرَّات مثل درب التبانة، وصولًا إلى ١٠^{١٠} كتل شمسية في المجرَّات الإهليلجية التي تبلغ كتلتها تريليون كتلة شمسية من النجوم. وبغض النظر عن حجم النظام النجمي، فإن الثقب الأسود المركزي يمثل نحو ١٪ من إجمالي كتلة النجوم، ولا يمثل سوى ٠,١٪ من كتلة المجرَّة عندما تُضمَّن كتلة المادة المظلمة.

لقد قضيت سنوات في محاولة لفهم حياة الثقوب السوداء فائقة الضخامة وتاريخها، وقد قضيت أنا وتلميذي جون ترامب عشرات الليالي في التلسكوبات ذات قطر طوله ٦,٥ أمتار في أريزونا وتشيلي. وتعني الأجهزة الحديثة أن البيانات التي كانت تستغرق وقتًا طويلًا لتجميعها يمكن جمعها في الوقت الذي يستغرقه طالب دراسات عليا لإنهاء أطروحته، ففي التحليل الطيفي الكلاسيكي، يمر ضوء إحدى المجرَّات

النشطة عبر فتحة التلسكوب ويتوزع في صورة طيف. وجَّه التلسكوب الذي كنا نستخدمه في شيلي فتحات صغيرة نحو مئات الأهداف على مساحة من السماء بحجم البدر. ربما تُسفِر طريقة التصوير بالتعرُّض الطويل عن ١٠٠ كتلة ثقب أسود. ومن خلال هذه البيانات، نأمل أن نروي قصة صعود نشاط الكوازار في الكون واختفائه، والكوازارات بعيدة للغاية لدرجة أنه لا فرق أين توجه التلسكوب، لكنني كنت أوجهه إلى جزء من السماء الجنوبية. إن مجرَّة درب التبانة الممتدة فوقنا تشبه ستارة رائعة مرقطة باللون الفضي، كما توجد أيضًا المجرَّات المجاورة، سحابات ماجلان التي تشبه كرات قطنية منثورة على قماش أسود. كان الظلام شديدًا في الخارج لدرجة أنني كنت أستطيع قراءة كتاب على ضوء النجوم.

جمعنا إحصاءات تتبعت المسار الكلي لتطور الثقب الأسود عبر الزمن الكوني، ويعني القيام بذلك أخذ عينات من جميع الثقوب السوداء، وليس الثقوب متطرفة الكتلة فقط، لقد تغلبت على هوس شبابي بالكوازارات وأردت الآن معرفة ما الذي يسيطر على معظم المجرَّات النشطة. وللتوضيح بمثال، إذا كنت تريد معرفة عدد السيارات، فستحصي عددًا أكبر من سيارات فورد وتويوتا من سيارات فيراري وأستون مارتن. تمثل أحد الألغاز الكبيرة في حقيقة أن الثقوب السوداء تنشط فقط بنسبة مئوية صغيرة من عمرها. أما اللغز الآخر فهو العلاقة الوثيقة بين كتلة الثقب الأسود المركزي للمجرَّة وكتلة كل النجوم القديمة في المجرَّة الموزعة على مسافات أكبر. يبدو الأمر كما لو أن الثقب الأسود «يعرف» نوع المجرَّة التي يعيش فيها.

تشير بياناتنا إلى أن أكبر الثقوب السوداء قد نمت بسرعة خلال بضعة مليارات سنة تلت الانفجار العظيم، ثم افتقدت الوقود. ونمت الثقوب السوداء الأصغر العديدة ببطء حتى أصبحت هي الأخرى هادئة في الغالب خلال الخمسة مليارات سنة الماضية. وانتهت فترة ذروة عصر الكوازارات، لكن الثقوب السوداء لم تختفِ؛ لذلك يُفترض أنها «جاعت»، مع القدر الأقل من الوقود اللازم لنشاطها مع مرور الوقت. هذا منطقي لأن الكون الآخذ في الاتساع يصبح أقل كثافة ويقل معدل تصادم المجرَّات. لكن بالنسبة إلى أي عصر معين في الزمن الكوني وأي كتلة مجرَّة معينة، لا يمكننا التنبؤ بالثقب الأسود الذي سوف ينشط والذي سيهدأ. والتنبؤ بمستقبل هذه الكوازارات على القدر نفسه من الصعوبة.

لقد حولنا البحث إلى لعبة، حيث وضعنا الكوازارات كأوراق على الطاولة، مثل جامعي الطوابع. هل كان بعضها ساطعًا لأنه كان لديه مجرَّة مصاحبة يتغذى عليها؟ كان هذا صحيحًا في حالات قليلة، ولكن هذه ليست حالة دائمة. هل بعضها معتم لأنه عاش في مجرَّة قليلة الغاز؟ ليس بالضرورة. لم نتمكن من تحديد أي سبب للنشاط النووي. إن الصورة الكلية منطقية، لكن النقاط الفردية فيها يمكن أن تمثل أي جزء.



شكل ٦٦: كتل الأجرام الكونية فائقة الكثافة، والتي تتدرج من الأقزام البيضاء إلى الثقوب السوداء فائقة الكتلة في نُوى المجرَّات. تتشكل الأنواع الثلاثة من الأجرام ذات الكتلة المنخفضة عندما تموت النجوم، بحيث تترك النجوم الأكثر ضخامة بقايا أكثر ضخامة. لا يُعرف سوى قليل من الثقوب السوداء متوسطة الكتلة، وقد عُثر عليها في مركز العناقيد المجريَّة المغلقة أو المجرَّات القزمة. وعُثر على الثقوب السوداء الأكثر ضخامة في مراكز المجرَّات الأكثر ضخامة في الكون.

«ناسا/مختبر الدفع النفاث/معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا»

إن الطبيعة مبدعة؛ إذ تصنع ثقوبًا سوداء تحتوي على مليارات الكتل الشمسية (شكل ٦٦). وخلال عملنا، لم نعثر على ثقب أسود حجمه يزيد عن الـ ١٠ مليارات كتلة شمسية. هذا مخيب للآمال بعض الشيء؛ فلطالما رغبت في كتابة ذلك في سيرتي الذاتية. يتنبأ المُنظِّرون بوجود قيود على الثقب الأسود الأكبر بعشرة أضعاف، أي نحو ١٠^{١١} كتل شمسية.[٢٤] فعند هذا المستوى تصبح فيزياء تراكم المادة مهمة، بغض

النظر عن كتلة المجرَّة المضيفة، يبدو أن هذا هو قيد الطبيعة على الثقوب السوداء، فلكي تنمو على نحو أكبر، سيتعين على الثقب الأسود أن يجمع ١٠٠٠ كتلة شمسية كل عام، وهذا الغاز سيتحول إلى نجوم جديدة على مسافة مئات السنين الضوئية قبل الوصول إلى الثقب الأسود. كما أن الثقب الأسود أيضًا سيبدأ في عملية تنظيم ذاتي، إذ إن فيضان الإشعاع الناتج سيدفع الغاز القادم إلى التوقف عن التغذية. وسيحاول الوحش المتضخم الوصول إلى الطعام، ولكن لا يوجد شيء في متناوله.

عصر البقايا النجمية

على الرغم من أن الثقوب السوداء الضخمة في مَراكز المجرَّات تقترب من الحد النهائي الطبيعي، فإن موت النجوم الضخمة لا يزال يؤدي إلى مزيد من الثقوب السوداء منخفضة الكتلة. ويعد تطور النجوم معركة بين قوى النور والظلام؛ حيث تُبقي طاقة الاندماج النووي النجم منتفخًا بينما تدفعه الجاذبية نحو التقلص. وكما رأينا، ستظل هذه القوى متوازنة في الشمس لمدة ٥ مليارات سنة أخرى، ثم ستفوز الجاذبية وتسحق اللُّب إلى قزم أبيض. وتتطور النجوم الضخمة بسرعة أكبر، وعندما تفوز الجاذبية فإنها تخلِّف وراءها نجومًا نيوترونية أو ثقوبًا سوداء.

يتجه الكون نحو الظلام، وقد تشكل النجم الأول بعد نحو ١٠٠ مليون سنة من الانفجار العظيم، عندما كان الكون أصغر بثلاثين ضعفًا وأكثر سخونة ممَّا هو عليه الآن، وبلغ تجمُّع المجرَّات وتكوُّن النجوم ذروته بعد الانفجار العظيم بنحو ثلاثة مليارات سنة، وهما في تراجع منذ ذلك الحين. تتشكل النجوم حاليًّا بمعدل واحد على ثلاثين من معدل ذروتها وسيستمر التراجع نظرًا لتناقص كميات الغاز اللازمة لتكوين نجوم جديدة. وحتى لو انتظرنا إلى الأبد، لن تتشكل سوى نسبة تبلغ ٥٪ من النجوم التي تشكلت حتى هذه اللحظة.[٢٥] وهذه مجرد متوسطات، ففي أي حقبة زمنية تتمتع المجرَّات الأكثر كثافة والأغنى بالغاز بمعدلات تكوين نجوم أعلى من المجرَّات الأقل كثافة وأقل غازًا. وسيتم تعويض الإمداد المتناقص من الغاز لفترة طويلة عن طريق النجوم التي تطرد بعض كتلتها في وقت متأخر من حياتها أو تموت كمستعرات عظمى.

إلى جانب انخفاض معدل تكوين النجوم الجديدة، سيتمثل جزء متزايد من الكتلة النجمية في جميع المجرَّات في شكل بقايا منضغطة. فما إن ينتهي تشكيل النجوم أخيرًا

ويتشكل آخر ثقب أسود، أي بعد ١٠٠ تريليون سنة تقريبًا من الآن، ستحقق الجاذبية نصرها النهائي.[٢٦] وبالمصادفة يمثل هذا متوسط العمر المتوقع للأقزام الحمراء منخفضة الكتلة، وهي نجوم باردة تزيد كتلتها قليلًا بدرجة كافية للحفاظ على استمرار عمليات الاندماج: ٠,٠٨ كتلة شمسية. إن الجدول الزمني كبير للغاية، فنحن ما زلنا في المرحلة الأولى من الكون الذي تُنيره النجوم، أي ما يعادل طفلًا عمره أسبوع واحد فقط.

في هذا المستقبل البعيد، مع انتهاء عصر النجوم، سينقسم الأربعمائة مليون نجم في مجرَّة ميلكوميدا بالتساوي بين أقزام بيضاء وأقزام بنية، مع بقايا ضئيلة من النجوم النيوترونية والثقوب السوداء. وستنضغط النجوم البالغة كتلتها ٠,٠٨ كتلة شمسية وأكبر والأقل من ٨ كتل شمسية إلى حجم الأرض تقريبًا، وتشع طاقتها المتبقية في الفضاء كأقزام بيضاء. والنجوم المنضغطة التي تتراوح كتلها ما بين ٠,٠٨ كتلة شمسية و٠,٠١ كتلة شمسية (من ١٠ إلى ٨٠ ضعفًا لكتلة المشترى) سوف تنضغط متحولة إلى أقزام بنية، وربما تدمج ذرات الهيدروجين لتكوين الليثيوم على نحو ضعيف.[٢٧] وستمثل النجوم النيوترونية ٠,٣٪ من مجموع بقايا النجوم في مجرَّة ميلكوميدا، وستمثل الثقوب السوداء نسبة ضئيلة تبلغ ٠,٠٣٪.

ومع مرور الوقت، ستبرد الأقزام البيضاء والأقزام البنية بحيث يتحول إشعاعها إلى موجات غير مرئية من الأشعة تحت الحمراء، ولفترة من الزمن ستصبح الثقوب السوداء في الأنظمة الثنائية ساطعة بسبب الغاز المسحوب من رفقائها. ولكن في النهاية سيصبح هؤلاء الرفقاء جثثًا نجميَّة وسينفد مصدر الغاز، وستتلاشى المجرَّات ببطء إلى الظلمة.

مستقبل مليء بالتبخر والاضمحلال

لا ينطبق المستقبل البعيد الذي وصفناه للتو على مجرَّة ميلكوميدا فقط، وإنما على كل مجرَّة ضمن مئات المليارات من المجرَّات الموجودة في الكون المرئي، فنجومها تخضع لقوانين الفيزياء الفلكية مثل نجوم نظامنا، ولكن أحفادنا لن يروا تحول جميع المجرَّات الأخرى للظلمة، والسبب في ذلك هو الطاقة المظلمة.

الطاقة المظلمة هي أكبر لغز في علم الكونيات، اكتشف علماء الفلك في عام ١٩٩٥ أن التمدد الكوني يتسارع بسبب شيء يعمل على نحو مضاد لقوة الجاذبية، والتي ينبغي أن تسبب تباطؤه، «البنية» الكونية تتكون من مادة مظلمة بنسبة ٢٥٪،

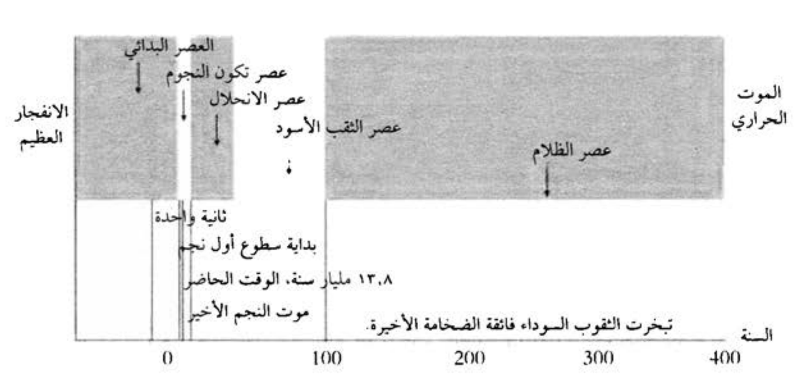
وطاقة مظلمة بنسبة ٧٠٪، ومادة عادية بنسبة ٥٪. أما الثقوب السوداء الكبيرة والصغيرة فتمثل ٠٫٠٠٥٪ من الكون؛ لذا فهي مكون ضئيل للغاية.[٢٨] وتعني الطاقة المظلمة أن المجرَّات التي نراها الآن ستختفي على نحو ثابت من المشهد؛ لأنها ستتراجع بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وخلال ١٠٠ مليار سنة أو ١٠ أضعاف عمر الكون حتى هذه اللحظة، ستكون جميع المجرَّات بخلاف ميلكوميدا قد خرجت من أفق حدثنا.[٢٩] وحينها سننشغل بأمورنا الخاصة، فلن نستطيع أن نشهد نهاية عصر النجوم والأحداث اللاحقة إلا في المجرَّة التي نعيش فيها الآن.

بعد أن تغرق ميلكوميدا في الظلمة، سيفعم المستقبل تبخر واضمحلال، بمرور الوقت تتبدل النجوم داخل المجرَّة الطاقة، حيث تميل النجوم الأخف إلى اكتساب الطاقة، بينما تميل النجوم الأثقل إلى فقد الطاقة. تذكر التشبيه الذي ذكرناه عن الوعاء الذي يحتوي على كرات رخامية سوداء وكرات خشبية بالحجم حيث إذا هززت الوعاء، تنتقل الكرات الرخامية إلى قاع الوعاء، ستحصل بعض النجوم على طاقة كافية لترك ميلكوميدا، تاركة المجرَّة لتصغر وتزداد كثافة. وهذا يُزيد من معدل التفاعل بين النجوم وبالتالي إلى تسريع العملية. في الوقت نفسه فإن تحلل المدارات النجمية الناجم عن انبعاث إشعاع الجاذبية سينقل النجوم إلى الداخل. وبعد حوالي 10^{19} سنوات ستكون نسبة ٩٠٪ من بقايا النجوم قد قُذفت خارج المجرَّة، ستتبخر مجرَّة ميلكوميدا، وستقع نسبة العشرة بالمائة المتبقية في الثقب الأسود فائق الضخامة. بعد اندماج درب التبانة مع أندروميدا، ستصير كتلة الثقب الأسود المركزي إلى نحو ٢٠٠ مليون ضعف لكتلة الشمس. وسوف ينمو في نهاية المطاف إلى نحو ١٠ مليارات كتلة شمسية.[٣٠] لو كانت تلك النقطة التي يمر بها الكون تعاصر أول أسبوع لك في الحياة، فستحتاج إلى أن تعيش ١٠ ملايين سنة أخرى لمشاهدة حدوث ذلك.

بعد ذلك يصير المستقبل البعيد ضبابيًا وتخيليًا، يشرع الفيزيائيون في تجاوز النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات لشرح سبب احتواء الكون على قدر من المادة أكبر بكثير من المادة المضادة، ومحاولة توحيد القوة الكهرومغناطيسية مع القوى النووية الضعيفة والقوية، وتسمى هذه المخططات النظريات الموحدة العظمى (Grand Unified Theories) ويتوقع معظمها تحلل البروتون. لو تحللت البروتونات، ستصبح المادة العادية غير مستقرة. لم يُرصد تحلل البروتون مطلقًا ويقدر الحد الحالي بـ 10^{34} سنوات، وهو ما يستبعد بعضًا من النظريات الموحدة العظمى، وليس

كلها.[31] ولو تحللت البروتونات فستتحلل كل بقايا النجوم باستثناء الثقوب السوداء إلى إلكترونات ونيتريونات وفوتونات.[32]

سيستغرق التحلل النهائي للكون فترة زمنية طويلة، وبافتراض أن المادة العادية تتحلل، لن يبقى سوى الثقوب السوداء النجمية والفائقة الضخامة. تنبأ ستيفن هوكينج بأن الثقوب السوداء تنبعث منها كمية ضعيفة من الإشعاعات منخفضة الطاقة والتي تتسبب في تبخرها ببطء، من المهم أن ندرك أن هذه مجرد تكهنات، حيث لم يُرصد إشعاع هوكينج مطلقًا ولا توجد تقنية لرصده حتى الآن. وتبلغ المدة الزمنية اللازمة لتبخر بقايا النجوم الضخمة ١٠^٧٦ سنوات، وسيتبخر الثقب الأسود فائق الضخامة الموجود في مركز ميلكوميدا خلال ١٠^١٠٠ سنوات، وتخفق التشبيهات بأي أشياء حياتية في نقل هذا المستوى من شبه الخلود، رغم أن هذه مجرد محطة على طريق الموت الحراري النهائي للكون (شكل ٦٧).



شكل ٦٧: الجدول الزمني للمستقبل البعيد للكون. على هذا المخطط اللوغاريتمي، يكون تاريخ الكون بأكمله حتى هذه اللحظة في أقصى اليسار. ولا يعد اختفاء الثقوب السوداء فائقة الضخامة عن طريق التبخر آخر عملية فيزيائية. فبعد فترة زمنية أخرى طويلة للغاية، تتحلل المادة العادية ويبقى الكون كحساء شديد الإنتروبيا من الجسيمات والفوتونات منخفضة الطاقة.

«كريس إمبي»

«الأشياء تتداعى، والمركز لا يستطيع الصمود، فوضى عارمة تجيش بالعالم»، هكذا كتب ويليام بتلر ييتس في عام ١٩١٩، معلقًا على الحرب العالمية الأولى،[33] لكنه ربما كان يتوقع نهاية الكون. والسياق العلمي لهذه النتيجة هو القانون الثاني للديناميكا

الحرارية: الميل الكوني نحو زيادة الإنتروبيا والاضطراب. أكد آرثر إدينجتون النسبية العامة لكنه لم يؤمن بتنبؤها بالثقوب السوداء، ومع ذلك فقد كان موقنًا بحتمية الموت الحراري، وقد كتب قائلًا: «إن القانون الذي ينصُّ على الزيادة الدائمة للإنتروبيا، كما أعتقد يحتل المكانة العليا بين قوانين الطبيعة. لو أن شخصًا ما أخبركَ أن نظريتك المفضلة بشأن الكون تتعارض مع معادلات ماكسويل، فهذا من سوء حظ معادلات ماكسويل، أما إذا تبيَّن أنها تتناقض مع بيانات الرصد، فربما يخطئ هؤلاء التجريبيون في بعض الأحيان. ولكن إذا وُجد أن نظريتك تتعارض مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية، فلا يمكنني منحك أي أمل، فلا يوجد مصير لها سوى الفشل الذريع المهين».[٣٤]

إن الثقوب السوداء غامضة؛ لذلك فهي جديرة بأن تكون آخر ما يتبقى عند نهاية الكون.

العيش مع الثقوب السوداء

لقد صارت قصتنا مظلمة كئيبة، لا تنسَ أن الكون مخلوق من أجل الحياة، وعلى الرغم من أن علماء الفلك لم يعثروا على أي أمثلة للحياة خارج الأرض، فإنهم متفائلون بشأن ذلك. في النظام الشمسي، هناك مواقع قابلة للعيش فيها مثل كوكب المريخ، وقمر أوروبا، وقمر تيتان، وعشرات أقمار الكواكب العملاقة حيث توجد المياه تحت قشرة من الصخور والجليد.[٣٥] وفي عام ١٩٩٥ اكتُشِفَ أول كوكب خارجي – أول كوكب يدور حول نجم آخر خارج المجموعة الشمسية – بعد عقود غير مثمرة من البحث. ومنذ ذلك الحين فُتِحَت بوابات الاكتشاف على مصراعيها، وبلغ التعداد الحالي للكواكب الخارجية المؤكدة أكثر من ٣٧٠٠ كوكب.[٣٦] واكتُشِفَت الكواكب الخارجية الأولى باستخدام طريقة دوبلر، والتي كشفتها بسبب طريقة اتباعها لنجمها الأم، ولكن في الآونة الأخيرة استخدمت معظم الاكتشافات طريقة العبور، حيث يختفي الكوكب الخارجي ويُخفي نجمه الأم مؤقتًا.[٣٧]

تحتوي مجرَّة درب التبانة على ١٠ مليارات كوكب شبيه بالأرض وذي سطح مناسب لاحتواء المياه السائلة، وهو عدد مذهل.[٣٨] ومعظم المائة مليار نجم الموجودين في درب التبانة لهم كواكب شبيهة بالأرض. لو أن الحياة لا تتطلب سوى مادة كربونية ومياه سائلة ومصدر محلي للطاقة، فقد يكون هناك عدة مئات من مليارات المواقع

الصالحة للسكن على أقمار وكواكب يكون سطحها أقل صلاحًا للحياة. ولكن عامل الوقت لا يقلُّ أهمية عن عامل المكان. كان هناك ما يكفي من الكربون في الكون لتكوين «نسخ» للأرض في غضون مليار عام من الانفجار العظيم؛ ولذلك فإن بعض الكواكب الشبيهة بالأرض كانت تتميز بميزة التطور قبل الأرض بثمانية مليارات سنة. ولكن جهلنا أكبر من أن يجعلنا نتخيل كل أشكال الحياة التي قد تتطور في هذه العوالم التي لا تُعد ولا تُحصى.

وإذا كنا لا نعرف شيئًا عن الحياة في عالم واحد آخر، فقد يبدو من الوقاحة أن نسأل عن احتمالات الحياة في المستقبل البعيد، ولكن دعنا نفعل ذلك على أي حال.

الحياة لا تحتاج إلى نجم؛ بل تتطلب ببساطة مصدر طاقة. ووفقًا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، تحتاج الحياة إلى اختلاف في درجة الحرارة ليكون المصدر صالحًا للاستخدام، والحياة على الأرض تستغل فرق درجة الحرارة بين الشمس والفراغ البارد في الفضاء. تمتص الأرض فوتونات من الشمس بدرجة حرارة ٦٠٠٠ كلفن وينبعث منها ٢٠ ضعفًا للفوتونات بدرجة حرارة ٣٠٠ كلفن نحو السماء. وتُجري الكائنات الحية عمليات معقدة تقلل من الإنتروبيا أو الفوضى على نطاق محيطهم، ولكن تلك الكائنات تنبعث منها حرارة أو طاقة مهدرة تشع في النهاية نحو الفضاء. وستنطبق حُجَّة الطاقة حينها حتى لو أصبحت الحياة حاسوبية (أي في صورة ذكاء اصطناعي) وليست بيولوجية؛ لأن أي تلاعب بالمعلومات يتطلب شكلًا من أشكال الطاقة.

عندما تستنفد النجوم في الكون وقودها النووي، فإن حضارة افتراضية في المستقبل البعيد ستظل تستغل فرق درجة الحرارة بين الجمرات الباردة - الأقزام البيضاء والأقزام البنية - والفضاء العميق. درس الفيزيائي فريمان دايسون مستقبل الحياة وخلص إلى أنه يمكن الحفاظ على الحياة البيولوجية في عصر يتناقص فيه المردود من خلال السبات لفترات طويلة على نحو متزايد.[٣٩] سينجح ذلك لمدة ١٠ مليارات سنة أو نحو ذلك، ولكن ماذا سيحدث عندما تتحول جميع النجوم إلى الظلمة؟

قد يأتي الخلاص من الثقوب السوداء؛ إذ يمكن أن تُستخرج الطاقة من دوران الثقب الأسود. توجد وراء أفق الحدث مباشرة منطقة تسمى «الغلاف الطاقي» (ergosphere). صيغت هذه الكلمة من كلمة يونانية تعني «عمل»، وقد صاغها جون ويلر، ولا مفاجأة في ذلك. تُسحب هذه الطبقة عن طريق الثقب الأسود الدوار

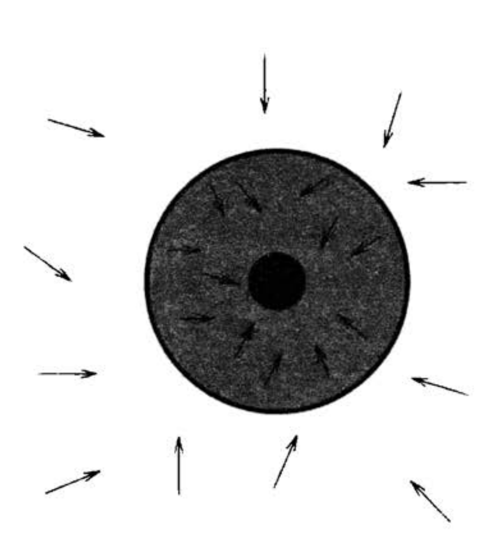
مثل المياه التي تُسحب بواسطة الدوامة، وتكون أرقَّ عند قطبي الثقب الأسود؛ تخيَّل بالونًا مليئًا بالماء يدور حيث يؤدي دورانه إلى انتفاخه عند خط استوائه، أشار روجر بنروز في عام ١٩٦٩ إلى أنه من الممكن استخراج الطاقة من هذا الغلاف الطاقي.[٤٠] فباتباع المسار الصحيح يمكن للجسم أن يدخل إلى الغلاف الطاقي ويخرج منه بطاقة أكبر ممَّا كان عليه قبل دخوله، ونتيجة لذلك سيدور الثقب الأسود على نحو أبطأ قليلًا، يمكن لإحدى الحضارات أن تُجري حسابات دقيقة، وتُلقي بأشياء في الثقب الأسود، ثم تحصد الطاقة الإضافية التي تكتسبها عند إخراجها مرة أخرى.

هناك فكرة ذكية أخرى تتمثل في قلب درجات الحرارة وجعل النجم باردًا والسماء ساخنة، غالبًا ما تكون الثقوب السوداء في الكون الحالي ساطعة لأن المادة تتجه نحوها وتُشكل قرصًا مزودًا ساخنًا. ومع ذلك، ففي المستقبل البعيد سيكون الغاز قد استُنفِدَ وستصبح الثقوب السوداء باردة ومظلمة، باستثناء رذاذ ضعيف من إشعاع هوكينج بدرجة حرارة مقدارها جزء صغير من الدرجة. بالمقارنة مع ذلك فإن للكون درجة حرارة معتدلة تصل إلى ٢٫٧ كلفن بسبب الإشعاع الناتج عن الانفجار العظيم، والتي ستنخفض مع استمرار تمدد الكون. ترى حسابات المُنظِّرين أن كوكبًا شبيهًا بالأرض يدور حول ثقب أسود قريب بما يكفي بحيث يبدو بحجم الشمس نفسه في سمائنا، يمكن أن يستخرج نحو كيلو واط من فرق درجة الحرارة.[٤١] ربما يكون هذا كافيًا للحفاظ على حياة حضارة مصغرة أو فعالة للغاية (شكل ٦٨).

استُخدمت استراتيجية مماثلة في فيلم «بين النجوم»، حيث يدور عالَم يُسمى «كوكب ميلر» بالقرب من الثقب الأسود الضخم الدوار جارجنتوا، وتتسبب الجاذبية في إبطاء الوقت لدرجة أنه في مقابل ساعة واحدة على هذا الكوكب تمر سبع سنوات خارج هذا العالم. وفي هذا السيناريو، يستطيع سكان كوكب ميلر توليد ١٣٠ جيجا واط من الطاقة، ولكن الفيلم قد أخطأ في تخيُّل أن الناس يمكن أن يعيشوا هناك؛ فهذه الكمية الكبيرة من الطاقة ترفع درجة حرارة الكوكب إلى ٩٠٠ درجة مئوية، وهي حرارة تكفي لإذابة المعادن.

إن مشكلة استخدام الثقوب السوداء كوسيلة لاستخلاص الطاقة من إشعاع الانفجار العظيم هي سرعة التمدد الكوني، تصل درجة حرارة هذا الإشعاع الآن إلى ٢٫٧ كلفن، ولكن بما أن الطاقة المظلمة تؤدي إلى نمو الكون على نحو آسي، فإن تلك الفوتونات تتمدد بفعل التمدد لتصبح منخفضة الطاقة وذات طول موجي طويل

للغاية، وخلال ١٠٠ مليار سنة ستكون درجة حرارة إشعاع الانفجار العظيم ضئيلة للغاية بحيث تبلغ جزءًا من الدرجة المئوية.



شكل ٦٨: هذه طريقة تستطيع بها حضارة في المستقبل البعيد أن تستخرج كمية صغيرة من الطاقة من الثقب الأسود، في كرة دايسون (Dyson sphere) التقليدية، يلتقط غلاف كروي مبني حول نجم، الطاقة من هذا النجم ويشع الحرارة المهدورة إلى الخارج. في هذه النسخة، يكون إشعاع هوكينج المنبعث من الثقب الأسود أكثر برودة من الإشعاع الميكروي المنبعث من الانفجار العظيم، ومن ثمَّ يمتص الغلاف إشعاع الميكروويف من الخارج ويشع الحرارة المهدرة إلى الثقب الأسود، ممَّا يخلف القليل من الطاقة التي يمكن حصادها.
«تي أباترني، وإل ريتشتريك، وبي باكالا، «أميريكان جورنال أوف فيزيكس»، المجلد ٨٥/ المعهد الأمريكي للفيزياء»

ستضطر الحضارات إلى تغيير استراتيجياتها. إن درجة حرارة إشعاع هوكينج المنبعث عن ثقب أسود ذي كتلة صغيرة تبلغ ٣ أضعاف كتلة الشمس تبلغ ٢ × ١٠^-٨ كلفن وسطوع يبلغ ١٠^-٢٩ واط. وهو سطوع ضعيف حقًّا، ولكن بصرف النظر عن دوران الثقب الأسود، ستكون هذه هي الطاقة الوحيدة المتاحة حتى تتبخر هذه الثقوب السوداء بعد ١٠^٧٦ سنوات، ولالتقاط جميع الإشعاعات يجب أن تحيط الحضارة الثقب الأسود بالكرة التي تخيَّل فريمان دايسون أن الكائنات الفضائية الذكية قد تستخدمها.[٤٢] ثم يتحول الانتباه إلى الثقب الأسود الضخم في مركز ميلكوميدا. فمع درجة حرارة

تبلغ ٦×١٠^{-١٨} كلفن وسطوع يبلغ $١٠^{-٤٨}$ واط، فإنه يشبه نارًا ضعيفة يمكن أن نتخيلها تدفئ اليدين. إن العيش في المستقبل البعيد سيتطلب الاقتصاد والصبر، ولكن إلى أن يتبخر الثقب الأسود الأخير بعد $١٠^{١٠٠}$ سنوات، فإن الوقت سيكون الشيء الوحيد المتوفر في الكون.

لقد رأيت ثقوبًا سوداء خلال أبحاثي، وهي ضخمة وغامضة، وتُرى عبر فجوات الفضاء في المجرَّات البعيدة. إن مقدار حياتي سيكون قصيرًا مقارنة بها؛ فكم من الوقت سوف تصمد؟ اطرف بعينيك بسرعة، كان بإمكانك فعل ذلك مليار مليار مرة منذ الانفجار العظيم. والفترة الزمنية اللازمة لتبدد الثقوب السوداء الأكثر ضخامة بالنسبة إلى عمر الكون تشبه ما يساويه عمر الكون بالنسبة لطرفة العين. وهكذا ثلاث مرات أخرى، للوصول إلى $١٠^{١٠٠}$ سنوات.

هذه الفترة الزمنية الطويلة لا يمكن تخيُّلها، إن كلمة "clock" (ساعة) غريبة؛ فهي مشتقة من كلمة إنجليزية من المرحلة الوسيطة التي تعني الجرس، وهو تنبيه بالوقت عندما لا يوجد في الساعة عقارب ولا أرقام بحيث لا يستطيع قراءة الساعة سوى قلة قليلة من الناس. فبعد وقت طويل من عصر البشر، وبعد ساعات البندول، وبعد الساعات الميكانيكية من تصنيع تيمكس ورولكس، وبعد أن تتحلل الذرات المشعة الأخيرة، وبعد أن يتوقف النجم النابض الأخير، سيحل عصر الثقوب السوداء.

أتخيل نفسي خالدًا، لو كنت أستطيع مشاهدة نهاية عصر الثقوب السوداء، ورؤية ما فعلناه نحن أو حضارات النجوم الأخرى، فما الذي سأراه؟

أولًا، سيجيء عصر بربري، امتداد للعصر الذي نعيش فيه، عندما تثور الحضارات بعضها ضد بعض ويكون أسوأ مصير لعدو مهزوم هو أن يُقذَف في ثقب أسود ويعاني من عذاب التمزق إربًا بسبب الجاذبية، ثم ربما يجيء عصر متحضر، تترك فيه المخلوقات صورًا مجمدة على آفاق حدث الثقوب السوداء الكبيرة كتذكارات خالدة. وكشخص متفائل، أتخيل مجيء «عصر المعرفة»، تتعلم فيه بعض الحضارات كيفية قراءة المعلومات الثلاثية الأبعاد المخزنة في أفق الحدث، ويغامر آخرون بدخول الثقوب السوداء الدوارة ليلجأوا إلى مكان يتلاقى فيه الزمن، عبارة عن قاعة من المرايا الزمنية حيث يمكنك السفر ذهابًا وإيابًا لمقابلة نفسك في الماضي والمستقبل، ولكن لا تستطيع مغادرتها أبدًا. وأخيرًا، يجيء عصر الموضوعية حيث تتقطر الحياة إلى صورة

حاسوبية خالصة وتصبح الثقوب السوداء شكلًا من أشكال تخزين المعلومات. كم يرضيني التفكير في أن هذه الشفرات ستحافظ على نبضات الكون.

الجاذبية هي أضعف قوة، لكنها الأعلى صوتًا والأكثر ثباتًا، فالقوى الأخرى انتهت منذ فترة طويلة، كل الجسيمات دون الذريَّة قد تحللت وضعف الإشعاع الكهرومغناطيسي وتمدد إلى غياهب النسيان. وصارت أوتار إشعاع الجاذبية المتصادمة نتيجة لاندماج الثقوب السوداء شيئًا من الماضي. والموسيقى الوحيدة التي تنبعث من الأجرام السماوية هي النغمات المنخفضة لدوران الثقوب السوداء. ولكنها تتبخر ببطء وثبات. هذه هي النهاية، فقد تحول الكون إلى السلاسة شبه المثالية، حيث لا يوجد في الفراغ سوى بعض التقلبات الكمومية.



الملاحظات



مقدمة

1- The phrase also alludes to a collection of short stories by the British writer Martin Amis. The stories dwell on the threat of nuclear war, and the allusion is to $E = mc^2$, the equation in which Einstein pointed to the enormous power of the atomic nucleus. See Martin Amis, *Einstein's Monsters* (London: Jonathan Cape, 1987).

الفصل الأول: أعماق الظلام

1- R. MacCormmach, *Weighing the World: The Reverend John Michell of Thornhill (Berlin: Springer, 2012).*

2- J. Michell, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London 74 (1784): 35-57.*

3- S. Schaffer, "John Michell and Black Holes," *Journal for the History of Astronomy* 10 (1979): 42-43.

4- The Michelson-Morley experiment was an attempt to detect the aether, a diffuse medium pervading space that was hypothesized to carry the force of gravity and mediate electromagnetic waves. This famous "failed" physics experiment found that light arrives at the same speed, regardless of the Earth's 30 kilometer-per-second motion around the Sun. The null result of this experiment was pivotal in framing the special theory of relativity. Recent data rules out the presence of a light-carrying medium at a level of one part in 10^{17}.

5- C. Montgomery, W. Orchiston, and I. Whittington, "Michell, Laplace, and the Origin of the Black Hole Concept," *Journal of Astronomical History and Heritage* 12 (2009): 90-96.

6- When I was a student studying physics in London, I visited Cambridge to try and get a measure of Isaac Newton. I wanted to understand the man behind the equations. With help from a colleague I got access to Newton's rooms at Trinity College. His study had narrow arched windows and was lined with dark wood, so it was gloomy even at noon. I'd read that he solved problems by "thinking upon them without ceasing," and my guide told me a story of one of the rare times Newton entertained guests. Going to the back room to get a bottle of port, he saw an unfinished calculation on his desk and sat down to complete it. His forgotten guests quietly let themselves out. Out in the quadrangle, I walked on the gravel paths where, 300 years earlier, Newton drew scientific diagrams with a stick. The Fellows of the College learned to sidestep them in case they interfered with a work of genius. That afternoon I drove to Newton's childhood home at Woolsthorpe Manor. As a youth, he was often sent into the nearby village on errands or to take the family horse to be shod. His mother would find him hours later standing on a bridge, staring at the water, lost in thought, the errands forgotten and the horse having slipped its traces. I was pleased to see an apple orchard behind the house.

7- From the preface to Richard S. Westfall, *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983).

8- J. Stachel et al., *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics* (Princeton: Princeton University Press, 1998).

9- Thought experiments are powerful tools for advancing science. Dating back to ancient Greek philosophy, they are a way of posing a hypothetical question to Nature. Galileo provides

an early example in physics, when he talks about dropping different objects from a tower to see their rates of descent (contrary to popular belief, he never actually did this experiment). Einstein used thought experiments to frame the issues of relativity, and physicists in the early twentieth century frequently used them to try and understand the implications of the quantum theory of matter.

10- The theory is mathematical and intimidating, but there are a number of popular or semi-technical introductions. Among the best are R. Geroch, *General Relativity from A to B* (Chicago: University of Chicago Press, 1978); D. Mermin, *It's About Time: Understanding Einstein's Relativity* (Princeton: University of Princeton Press, 2005); and of course the classic by Albert Einstein, *Relativity: The Special and General Theory* (New York: Crown, 1960). For a biography of Einstein, see A. Pais, *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

11- *The Sonnets of Robert Frost,* edited by J. M. Heley (Manhattan, KS: Kansas State University, 1970).

12- D. E. Lebach et al., "Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves Using Very-Long-Baseline Interferometry," *Physical Review Letters* 75 (1995): 1439-42.

13- C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, and D. J. Wineland. "Optical Clocks and Relativity," *Science* 329 (2010): 1630-33.

14- N. Ashby, "Relativity and the Global Positioning System," *Physics Today,* May 2002, 41-47.

15- Quoted in S. Chandrasekhar, "The General Theory of Relativity: Why Is It Probably the Most Beautiful of All Existing Theories," *Journal of Astrophysics and Astronomy* 5 (1984): 3—11.

16- I struggled with general relativity as a graduate student, and the experience convinced me that my future lay in observa-

tion rather than theory. Many years later I spent some time in Einstein's shadow while on sabbatical in Princeton. He spent nearly twenty years there, from 1936 until his death, working not at Princeton University but at the nearby Institute for Advanced Study. I once poked my head into his old office, apologizing to its current occupant, noted Canadian mathematician Robert Langlands. Walking from my rented house to the Institute, I passed Einstein's white clapboard house on Mercer Street. His house was later occupied by the physicist Frank Wik- czek and then the economist Eric Maskin, both also Nobel Prize winners. I wondered if living in a house with that lineage would make you smarter. After Einstein died, his remains vanished. The autopsy surgeon removed Einstein's brain and stored parts of it in a jar in his office in Weston, Missouri. An ophthalmologist removed his eyes and stored them in a bank vault. In Princeton, I'd heard the rumor that his ashes were strewn into the Delaware River south of town. I ran along the riverbank and mused on the convoluted paths through space and time that had taken his atoms from the big bang, cycled them through the cores of stars, brought them together briefly for the singular insights of relativity, and then dispersed them to the sea.

17- *The Collected Papers of Albert Einstein,* volume 8A, *The Berlin Years: Correspondence,* edited by R. Schulmann, A. J. Kox, M. Janssen, and J. Illy (Princeton: Princeton University Press, 1999).

18- A. Pais, *J. Robert Oppenheimer: A Life* (Oxford: Oxford University Press,2006).

19- J. R. Oppenheimer and H. Snyder, "On Continued Gravitational Contraction," *Physical Review* 56 (1939): 455-59.

20- R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (New York: Simon & Schuster, 1986).

21- J. A. Hijaya, "The Gita of Robert Oppenheimer," *Proceedings of the American Philosophical Society* 144, no. 2 (2000), https://amphilsoc.org/ publications/proceedings/v/144/n/2.

22- C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation* (New York: W. H. Freeman, 1973).

23- A. Finkbeiner, "Johnny and Oppie," 2013, http://www.lastwordonnothing.com/2013/08/21/6348/.

24- Several excellent books have discussed Oppenheimer's complex feelings about his work on the bomb, and his fall from grace. See K. Bird and M. J. Sherwin, *American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer* (New York: Alfred A. Knopf, 2005), and M. Wolverton, *A Life in Twilight: The Final Years of J. Robert Oppenheimer* (New York: St. Martin's Press, 2008). An inside account of the atomic bomb project is H. Bethe, *The Road from Los Alamos* (New York: Springer, 1968). Many physicists were particularly bitter toward Edward Teller, who was more hawkish than Wheeler and who pointedly failed to support Oppenheimer when he was stripped of his security clearance.

25- Quoted secondhand in Wheeler's autobiography: J. A. Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998).

26- In fact, the story is more complicated. Research by Marcia Bartusiak showed that the term "black hole" was first used at a scientific meeting in late 1963 and first appeared in print in early 1964. It is, however, indisputable that the term spread due to Wheeler's reputation. See https://www.sciencenews.org/blog/context/50-years-later-it's-hard-say-who-named-black-holes.

27- S. Hawking, *A Brief History of Time* (New York: Bantam, 1988). Hawking noted that the publisher told him that for every equation in the book, readership would be cut in half. So

he pruned math from the initial manuscript down to the single equation $E = mc^2$. Nevertheless, the book is quite dense, so he followed up with a shorter, simplified version: S. Hawking, *The Illustrated Brief History of Time* (New York: Bantam, 1996). Carl Sagan's introduction to the first edition tells the story of an accidental encounter in London in 1974, as Hawking was being inducted into the Royal Society. As he watched the young man in a wheelchair slowly signing his name in a book that had Newton in its earliest pages, he realized Hawking was a legend even then.

28- Stephen Hawking was often reduced in the popular culture to an archetype—a brilliant intellect trapped in a wasting body—so it's difficult to get a sense of him as a person. Fleshing out the third dimension leads to some uncomfortable truths. His first wife, Jane Wilde, sacrificed her own academic career to care for Stephen and raise their three children, with minimal assistance. He later left her to live with one of his nurses (whom he married and then divorced). Wilde's memoir paints a picture of a man who could be an egotist and a misogynist, but her perspective has been subsumed by his written accounts and media treatments of the physicist that adhere to the heroic narrative. The edges to his personality don't mitigate his remarkable good spirits in the face of a lifelong debilitating illness. See Jane Hawking, *Music to Move the Stars: A Life with Stephen Hawking* (Philadelphia: Trans-Atlantic, 1999), and her second, softer version of the story, *Travelling to Infinity: My Life with Stephen* (London: Alma, 2007).

29- K. Ferguson, *Stephen Hawking: His Life and Work* (New York: St. Martin's Press, 2011). Older, but better on his contributions to physics, is M. White and J. Gribbin, *Stephen Hawking: A Life in Science* (Washington, DC: National Academies Press, 2002).

30- Euclidean geometry is the familiar formalism that applies to

the linear space of Newtonian gravity. To come up with general relativity, Einstein reached into the toolbox of topology, a field of mathematics that describes space (with an arbitrary number of dimensions) that is deformed by stretching, crumpling, or bending. Part of his genius was to realize that the mathematics could be incorporated into a physical theory of gravity.

31- S. Hawking and R. Penrose, "The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology," *Proceedings of the Royal Society A* 324 (1970): 539-48.

32- Electric charge is a third possible property of a black hole. However, since black holes form from the collapse of matter that's electrically neutral, a charged black hole is considered artificial and unlikely. The electrical force is forty orders of magnitude stronger than gravity, so even a slight electric charge would stop a black hole from forming. Roy Kerr generalized the solution of a black hole to the spinning case, nearly fifty years after Schwarzschild's first solution, in R. P. Kerr, "Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics," *Physical Review Letters* 11 (1963): 237-38. General relativity allows for such complex geometries of space-time that the equations can rarely be solved fully, and they can only be solved approximately by making strong assumptions about symmetry.

33- J. D. Bekenstein, "Black Holes and Entropy," *Physical Review D* 7 (1973): 2333-46.

34- S. Hawking and R. Penrose, *The Nature of Space and Time* (Princeton: Princeton University Press, 2010), 26. Hawking wrote many highly technical papers on black hole radiation and evaporation, but a slightly more accessible paper is S. Hawking, "Black Hole Explosions?" *Nature* 248 (1974): 31-32.

35- A. Einstein and N. Rosen, "The Particle Problem in the General Theory of Relativity," *Physical Review Letters* 48 (1935): 73-77.

36- S. Weinberg, *The First Three Minutes* (New York: Basic Books, 1988), 131.

37- M. Amis, *Night Train* (New York: Vintage, 1999), 114.

38- A. Z. Capri, *From Quanta to Quarks: More Anecdotal History of Physics* (Hackensack, NJ: World Scientific, 2007).

39- The colloquial meaning of entropy is disorder, but the original definition from physics is related to the number of equivalent microscopic configurations of a system. Since there are a huge number of ways to make a black hole, compared to the fairly limited number of ways to make a star, black hole entropy is very high. Mathematically, a black hole the mass of the Sun has an entropy 100 million times higher than that of the Sun.

40- D. Overbye, "About Those Fearsome Black Holes? Never Mind," *New York Times,* July 22, 2004, http://www.nytimes.com/learning/students/pop/20040723snapfriday.html.

41- This is a nod to Einstein, who called his alteration of a general relativity solution to match the astronomers' early 1900s' description of a static universe his "biggest blunder." Einstein added a term called the cosmological constant to counter gravity. Ironically, the universe is now known to be accelerating and that behavior is well described by the cosmological constant.

42- We're very familiar with tidal forces that operate in the Solar System. The near side of the Earth experiences stronger gravity from the Moon than the far side of the Earth, and when the oceans respond to this difference it creates the tides. The Sun also exerts a tidal force on the Earth, smaller because of its larger distance. When the tidal force on a solid object like

a moon or an asteroid exceeds the strength of the rock, the object breaks up. This location is called the Roche limit. Tidal forces on Jupiter's small moon make it the most active volcanic world in the Solar System. Mathematically, the tidal acceleration across an object of size d a distance R from an object of mass M is $2GMd/R^3$.

43- Scientific wagers have an intriguing history. One of the first known also involved gravity. In 1684, the English architect Christopher Wren offered a book worth two pounds (equivalent to $400 today) to anyone who could deduce Kepler's laws of planetary motions from an inverse square law for gravity. His wager was a deliberate effort to spur Isaac Newton into completing the calculation and publishing the result, which he later did in his mas- terwork on gravity, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica.* Newton missed the deadline for the bet.

44- A. Strominger and C. Vafa, "Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy," *Physical Letters B* 379 (1996): 99-104.

45- Reconciling quantum theory with general relativity consumed the last twenty years of Einstein's life. He was never successful. Some of the most obvious ideas about quantum gravity, such as that gravity is carried by a particle called the graviton, quickly run into technical problems. The role of time is also very different in quantum mechanics and in general relativity. String theory is considered a promising approach, but it generates a vast number of vacuum states that are difficult to sort through. Ironically, some of the recent progress made describing black holes with string theory involves switching off gravity! It will probably be a number of years before this research matures or generates predictions that can be tested.

46- A. Strominger and S. Hawking, "Soft Hair on Black Holes," *Physical Review Letters* 116 (2016): 231301-11. A more di-

gestible interview with Andy Strominger about this work is in Seth Fletcher's blog *Dark Star Diaries,* http://blogs.scientificamerican.com/dark-star-diaries/stephen-hawking-s-new-black-hole-paper-translated-an-interview-with-co-author-andrew-strominger/.

الفصل الثاني: ثقوب سوداء من موت النجم

1- The pressure balance within a star getting its energy from nuclear fusion is called hydrostatic equilibrium. The process has negative feedback and acts like a thermostat. If for some reason the Sun felt pressure from outside and was squeezed, the temperature of the denser gas would go up, the nuclear reaction rate would go up, and more pressure would be created, expanding the Sun slightly. If for some reason the Sun expanded slightly, the interior temperature would go down, the nuclear reactions rate would also go down, and with less pressure created the Sun would shrink slightly. Stars like the Sun are long-term stable and nothing like bombs.

2- A star fusing hydrogen into helium is said to be on the main sequence. In the early twentieth century, astronomers Ejnar Hertzsprung and Henry Norris Russell showed that when the luminosity of a star is plotted against its color or surface temperature, it doesn't occupy all parts of that diagram. Most stars fall on a diagonal running from high luminosity and high temperatur to low luminosity and low temperature. Stars fusing other nuclear fuels or stars that have collapsed to their end states lie in other parts of the diagram.

3- The radiation law that governs stars is called the Stefan-Boltzmann law. It describes a blackbody, an object that is in equilibrium and has a constant temperature. The law says the total power radiated by a star is proportional to the product of the surface area and the temperature to the fourth power. So radia-

tion emitted goes down quickly with decreasing size and even quicker with decreasing temperature.

4- E. Öpik, "The Densities of Visual Binary Stars," *Astrophysical Journal* 44 (1916): 292-302.

5- A. S. Eddington, *Stars and Atoms* (Oxford: Clarendon Press, 1927), 50.

6- Quoted in J. Waller, *Einstein's Luck* (Oxford: Oxford University Press, 2002).

7- The physical state of a white dwarf is called degenerate matter. Degeneracy pressure depends only on density, not on temperature. Degenerate matter is compressible, so the radius of a high-mass white dwarf is smaller and its density is higher than those of a low-mass white dwarf. The carbon-rich nature and quasi-crystalline atomic structure of white dwarfs led the rock group Pink Floyd to allude to them (and to their founding member Syd Barrett) in the song "Shine On, You Crazy Diamond," on their 1975 album *Wish You Were Here.*

8- S. Chandrasekhar, "The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs" *Astrophysical Journal* 74 (1931): 81-82.

9- J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff, "On Massive Neutron Cores," *Physical Review* 55 (1939): 374-81.

10- P. Haensel, A. Y. Potekhin, and D. G. Yakovlev, *Neutron Stars* (Berlin: Springer, 2007).

11- Robert Forward accepted the challenge with *Dragon's Egg* (New York: Del Rey, 1980), now considered a classic of hard science fiction. He imagined tiny intelligent creatures that could live on the surface of a neutron star, with development and thought timescales a million times faster than humans.

12- See J. Emspak, "Are the Nobel Prizes Missing Female Scientists?" *Live- Science,* October 5, 2016, http://www.livescience.com/56390-nobel-prizes-missing-female-scientists.

html .Women have fared only slightly better with other Nobel Prize subjects. Astronomy has gradually improved its gender balance, but men still outnumber women in the highest academic ranks and they win the lion's share of the major awards. I know Jocelyn Bell fairly well; we overlapped for a while at the Royal Observatory in Edinburgh and she and my mother went to the same Quaker meeting house for years. She vividly remembers the moment of discovery, seeing metronomic squiggles on a strip chart that had no obvious explanation. She played sleuth, tracking down and ruling out other explanations one by one. As for the Nobel Prize, there's no hint of bitterness when she talks about that early omission, and she's had an illustrious career in every other way. For her own story, see J. S. Bell Burnell, "Little Green Men, White Dwarfs, or Pulsars?" *Annals of the New York Academy of Science* 302 (1977): 685-89.

13- N. N. Taleb, *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable (Lon*don: Penguin, 2007). In this case, the black swan represents black holes, which had been predicted but were expected to be rare, and which some people thought could never be detected.

14- S. Bowyer, E. T. Byram, T A. Chubb, and H. Friedman, "Cosmic X-Ray Sources," *Science* 147 (1964): 394-98.

15- The two papers that established Cygnus X-1 as the first viable black hole candidate were B. L. Webster and P. Murdin, "Cygnus X-1: A Spectroscopic Binary with a Massive Companion?" *Nature* 235 (1971): 37-38, and T. Bolton, "Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868," *Nature* 235 (1971): 271-73. The paper that provided an accurate radio position for the X-ray source was L. L. E. Braes and G. K. Miley, "Detection of Radio Emission from Cygnus X-1," *Nature* 232 (1971): 246.

16- From Bruce Rolston, "The First Black Hole," news release,

University of Toronto, November 10, 1997, https://web.archive.org/web/20080307181205/ http://www.news.utoronto.ca/bin/bulletin/nov10_97/art4.htm.

17- The Canadian progressive rock band Rush heard about the first black hole soon after its discovery and wrote a song cycle called "Cygnus X-1," which featured on two of their albums, in 1977 and 1978. In this allegorical work, the explorer ventures into the black hole, crying out with a cry of "Sound and fury drown my heart. Every nerve is torn apart." In the second part of the cycle he's beyond the event horizon in a world called Olympus, where he reconciles the warring tribes of Apollo, who are ruled by logic, and Dionysus, who are ruled by emotion. The apotheosis of astronomy and rock was two years earlier. In 1975, Pink Floyd released their concept album *Wish You Were Here,* featuring the nine-part composition "Shine On You Crazy Diamond." The song is a double metaphor, on the one hand paying tribute to a man who shone brightly but flamed out while he was still young, and on the other hand alluding to white dwarfs as quasi-crystalline carbon. "There's a look in your eyes like black holes in the sky," Roger Waters sang.

18- It's similar to the situation with a seesaw or teeter-totter. When two people of equal weight sit at either end, they are balanced. With an adult and a child, the adult has to sit nearer the pivot to balance the child. This lever arm with a center of balance behaves like an orbit with a center of mass. When the masses are extremely unequal, like a planet orbiting a star, the star orbit is so subtle that it just wobbles. For example, Jupiter, the most massive planet in the Solar System, causes the Sun to wobble around its edge with a period equal to the 12 years of Jupiter's orbital period.

19- Orbits are generally elliptical rather than circular, but that complication doesn't affect the main argument. The velocity

changes through the orbit, but the average velocity is the same as for a circular orbit of the same size.

20- The full solution to a binary orbit gives the equation $PK^3/2nG = M\, sin^3 i/\ (1+q)^2$, where P is the period, K is half the full amplitude of the radial velocity variation, M is the black hole mass, and q is the ratio of the companion mass to the black hole mass.

21- D. Sobel, *The Glass Universe: How the Ladies of the Harvard Observatory Took the Measure of the Stars* (New York: Viking, 2016).

22- C. Brocksopp, A. E. Tarasov, V. M. Lyuty, and P. Roche, "An Improved Orbital Ephemeris for Cygnus X-1," *Astronomy and Astrophysics* 343 (1998): 861-64.

23- J. Ziolkowski, "Evolutionary Constraints on the Masses of the Components of the HDE 226868/Cygnus X-1 Binary System," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 358 (2005): 851-59.

24- J. A. Orosz et al., "The Mass of the Black Hole in Cygnus X-1," *Astrophysical Journal* 724 (2011): 84-95.

25- This brief discussion elides dozens of papers and thousands of hours of observations that elevated Cygnus X-1 to the status of a gold-plated black hole candidate. It took years for the observational errors to be reduced and other models to be ruled out. For example, as a way of avoiding the black hole inference, early models invoked a triple star system, with a blue supergiant and close binary consisting of a main sequence star and a neutron star. These models were eventually found to be highly unlikely. See H. L. Shipman, "The Implausible History of Triple Star Models for Cygnus X-1: Evidence for a Black Hole," *Astrophysical Letters* 16 (1975): 9-12.

26- J. Ziolkowski, "Black Hole Candidates," in *Vulcano Workshop 2002, Frontier Objects in Astrophysics and Particle*

Physics, edited by F. Giovanelli and G. Mannocchi (Bologna: Italian Physical Society, 2003), 49-56, and J. E. McLintock and R. A. Remillard, "Black Hole Binaries," in *Compact Stellar X-Ray Sources,* edited by W. H. G. Lewin and M. van der Klis (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), 157-214.

27- There's another way to detect isolated black holes, based on the fact that they can pull in tenuous gas from the interstellar medium. If this gas heats up as it falls onto the black hole, it will emit a distinctive spectrum of visible radiation. One study sifted through nearly 4 million stellar sources from the Sloan Digital Sky Survey and ended up with forty that had the appropriate optical colors and weak X-ray emission. None has been confirmed as a black hole so the jury is still out on this method.

28- Dark matter is one of the great unsolved problems in cosmology. Star motions in galaxies of all types show that they must be held together by some form of matter that doesn't emit light but adds up to 6 times the sum of all stars. Microlensing surveys were used to show that, at least in the Milky Way, dark matter can't be composed of stellar remnants or sub-stellar objects. Infrared observations additionally rule out rocky objects, all the way from planets to dust grains. The best remaining explanation is a new form of massive, weakly interacting subatomic particle.

29- L. Wyrzykowski, Z. Kostrzewa-Rutkowska, and K. Rybicki, "Microlensing by Single Black Holes in the Galaxy," *Proceedings of the XXXVII Polish Astronomical Society,* 2016. Despite the difficulty, microlensing is an important complement to black hole statistics from binary systems. Black holes in binaries are not found smaller than 6 solar masses, and neutron star masses almost all lie between 1 and 2 solar masses. There seems to be a "gap" in the mass distribution of stellar

remnants from 2 to 6 solar masses, potentially challenging current theories of remnant formation. Reassuringly, microlensing shows no such gap.

30- E. A. Poe, "A Descent into the Maelstrom" (1841), in *The Collected Works of Edgar Allan Poe,* edited by T. O. Mabbott (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978).

31- America's venerable Hoover Dam, opened in 1936, generates 25 times less electricity, and doesn't crack the top fifty in the world in terms of power production. The highest peak power production is from the controversial Three Gorges Dam in China, but averaged over a year the Itaipu Dam slightly edges it out.

32- The angular momentum of a particle is *mvr,* the mass of the particle times its velocity times its distance from the black hole. Kepler's second law shows how angular momentum is conserved in an orbit. When a planet or a comet moves closer to the Sun, it moves faster, so *r* goes down but *v* goes up to compensate, and the product is constant.

33- The actual calculation requires general relativity and some numerical approximations. The only more efficient energy production process is matter- antimatter annihilation, which releases mass-energy with 100% efficiency. However, that is a very rare situation in the universe, whereas accretion power is seen coming from all black holes in binary systems. For the full story, see a textbook like J. Frank, A. King, and D. Raine, *Accretion Power in Astrophysics*, 3rd edition, (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002).

34- The thorny problem was figuring out how angular momentum could be lost to allow matter to fall in. The answer involved turbulence and the role of magnetic fields that thread the accretion disk. The first "standard" accretion disk model, which partially solved the problem, was N. I. Shakura and R.

A. Sunyaev, "Black Holes in Binary Systems: Observational Appearance," *Astronomy and Astrophysics* 24 (1973): 337-55. The breakthrough was the realization that magnetic fields can greatly boost angular momentum transport; see S. A. Balbus and J. F. Hawley, "A Powerful Local Shear Instability in Weakly Magnetized Disks: I. Linear Analysis," *Astrophysical Journal* 376 (1991): 214-33. It took the power of modern computers to fully model the situation. 3D magneto-hydrodynamics calculations are among the most challenging in astrophysics.

35- D. Raghavan et al., "A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-Type Stars," *Astrophysical Journal Supplement* 190 (2010): 1-42.

36- The imaginary surface defining the region where material is bound to a star in a binary system is called a Roche lobe, after a French astronomer and mathematician of the mid-nineteenth century. Roche lobes are stretched from spheres for isolated stars to teardrop shapes for close binaries. In a detached binary, each star has its own Roche lobe. In a semi-detached binary, the teardrops touch and mass can flow through the point where they meet, the Lagrangian point, named after an Italian astronomer and mathematician of the mid-eighteenth century. In a contact binary, the stars have a common envelope and much of the mass is shared. When the stars have wider separations mass can pass between them if one star is massive and has a wind; a fraction of the gas flowing out in all directions will fall onto the companion.

37- D. Prialnik, "Novae," in *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics,* edited by P. Murdin (London: Institute of Physics. 2001), 1846-56. About 10 novae are discovered in the Milky Way each year, and they mostly flare up on timescales ranging from 1,000 to 100,000 years. A few spectacular novae flare up within a human lifetime and brighten enough to be visible without a telescope. T Coronae Borealis, or the "Flare Star,"

flared to become one of the brighter stars in the sky in 1866 and 1946, and RS Ophiuchi has flared enough to be visible with the naked eye five times in the past century, most recently in 2006.

38- This scenario might seem minor and esoteric, but it is central to modern astronomy. Some supernovae (called Type 2) happen when a single massive star dies, but they have luminosities that vary widely. However, when a supernova goes off in a binary system (called Type 1a), it's the result of matter being "spooned onto" a white dwarf in a regulated way, so the luminosity only varies from one system to another by 15%. These supernovae are "standard bombs," so they are also "standard light bulbs" that can be used to measure distance. Since a supernova can be as bright as an entire galaxy, they are visible out to distances of billions of light years. Type 1a supernovae were used to discover the accelerating universe and dark energy in the mid-1990s, work that resulted in a Nobel Prize. See S. Perlmutter, "Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe," *Physics Today,* April 2003, 53-60.

39- K. A. Postnov and L. R. Yungelson, "The Evolution of Compact Binary Systems," *Living Reviews in Relativity* 9 (2006): 6-107.

الفصل الثالث: الثقوب السوداء فائقة الضخامة

1- The telescope cost him $2,000, equivalent to about $33,000 today. Reber was a one-man shop, laying cement, doing his own metalwork and woodwork, wiring and building the receiver, making the observations, and reducing the data and interpreting it astronomically.

2- As the Earth orbits the Sun, every star rises and sets four minutes earlier each day. That adds up to twenty-four hours over a year, and the whole sky cycles through our night. Star time, or

sidereal time, is therefore slightly different from Sun time, or solar time. Jansky used this to show that his radio signal had an extraterrestrial origin, just as Jocelyn Bell did decades later with pulsars.

3- K. Jansky, "Electrical Disturbances Apparently of Extraterrestrial Origin," *Proceedings Institute of Radio Engineers* 21 (1933): 1837. There's a remarkable parallel with the accidental discovery of microwave radiation left over from the big bang three decades later. In 1964, Arno Penzias and Robert Wilson, at Bell Labs, were looking into the feasibility of satellite communications using microwaves. When they tracked down noise sources in their radio receiver they found a weak residual "hiss" that had the same intensity in all directions in the sky. It was radiation from the early universe, cooled and diluted by cosmic expansion. This time, Bell Labs took notice. Penzias and Wilson won the Nobel Prize in Physics in 1978 for their discovery.

4- In honor of his pioneering contribution, the unit of radio radiation strength was named the jansky, so he joined a handful of other electrical pioneers with units named after them: Watt. Volt, Ohm, Hertz, Ampere, and Coulomb. Jansky died in 1950 at the age of forty-four, from Bright's disease that led to kidney failure. He never got to see the rapid growth of the subject he started.

5- Quoted in W. T. Sullivan, ed., *Classics of Radio Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982).

6- This story is told by John Kraus in *Big Ear* (Delaware, OH: Cygnus-Quasar Books, 1994), and in J. D. Kraus, "Grote Reber, Founder of Radio Astronomy," *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 82 (1988): 107-13.

7- G. Reber, "Cosmic Static," *Astrophysical Journal* 100 (1944): 279. See also the commentary written for the centennial issue

of the journal, K. I. Keller- man, “Grote Reber’s Observations of Cosmic Static,” *Astrophysical Journal* 525 (1988): 371-72.

8- Kraus, “Grote Reber, Founder of Radio Astronomy.”

9- In spectroscopy, the wavelengths of the spectral lines match to elements and give chemical composition, but the nature of the lines indicates the physical situation of the gas. When cooler gas is outside a hotter source of energy, like the outer envelope of a star, absorption lines are seen. That’s what von Fraunhofer first saw in the Sun in the early 1800s. When gas is energized so that the electrons are tripped off all the atoms, it leads to a set of emission lines, indicating a very hot source. And when in addition the spectral lines are broad, the large velocity range indicates a violent source of energy to cause the motion of the gas.

10- S. J. Dick, *Discovery and Classification in Astronomy: Controversy and Consensus* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013).

11- I was lucky to use the 100-inch telescope on Mount Wilson the year before the Carnegie Institution mothballed it. The growing lights of Los Angeles had made it uncompetitive years before, but it was exciting to use a telescope that had been the world’s largest for thirty years, the telescope Edwin Hubble used to show that galaxies were remote from the Milky Way and that the universe was vast and expanding. I remember the row of wooden lockers behind the north pier, one of which had Hubble’s name neatly etched on a brass plaque. Perhaps Hubble left his last night lunch inside? Walking on the dome floor, I saw beads of mercury underfoot. The telescope bearings floated on mercury and it leaked; over the years several staff members died from too much contact with it. In Hubble’s time, the observers worked for a few hours, stopped for dinner followed by port and cigars, and then resumed their labors. Dinner at Mount Wilson was old-school and formal. The se-

nior astronomer on the mountaintop sat at the head of the table, with other staff astronomers nearby, and the students and postdocs like me at the far end of the table. Dinner was served by a brilliant but tempestuous French chef who had started a number of restaurants around Los Angeles, but each one had failed as he fell out with his patrons and backers. Mount Wilson Observatory was a perfect haven for someone who was creative but had sociopathic tendencies. The food was sumptuous, but so rich that I found myself hallucinating as the night wore on. To clear my head I walked out onto the catwalk that circled the dome three stories up. Stars twinkled above while the city lights spread out below in a glowing, quilted grid.

12- C. K. Seyfert, "Nuclear Emission in Spiral Galaxies," *Astrophysical Journal* 97 (1943): 28-40.

13- Ryle and Lovell were physicists who clearly saw the power of radio techniques to open up a new window on the universe. They easily moved past the gulf that had separated the engineering and science "cultures" and they each started a major university research group, turning radio astronomy into just another branch of astronomy. The wartime radar expert Robert Dicke started a research group at MIT, but radio astronomy was surprisingly slow to take off in the United States, given that it was the home of Jansky and Reber.

14- Ruby Payne-Scott's contributions have been described in M. Goss, *Making Waves: The Story of Ruby Payne-Scott, Australian Pioneer Radio Astronomer* (Berlin: Springer, 2013). The early story of radio astronomy is excellently told in W. T. Sullivan III, *Cosmic Noise: A History of Early Radio Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009).

15- The confusion deepened when Ryle and others showed that the radiation from Cygnus A was in fact steady. The variations that had been observed were due to bending of radio waves by clouds of ionized gas in the Earth's upper atmo-

sphere. Ironically, this didn't kill the "radio star" hypothesis because, in optical light, stars twinkle and planets don't. This is because stars are point-like and planets are disk-like, so a planet's twinkling is washed out for an observer on the Earth. By the same logic, if Cygnus A twinkles it must be point-like or at least have a small angular size.

16- B. Lovell, "John Grant Davies (1924-1988)," *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 30 (1989): 365-69.

17- The actual formula is $Q = 1.22$ (A/D), where Q is the angular resolution or width of the beam in radians, A is the wavelength of observation and D is the telescope diameter (measured in the same units).

18- The method is a radio analog of Michelson's interferometer or Young's double slit experiment. Imagine a source directly overhead for two radio dishes. The path length taken by the waves to each dish is the same, so when those waves are combined they add to give a higher amplitude. As the source moves, the path difference changes; when it's half a wavelength the two signals combine and cancel out. So as the source moves, a fringe pattern of high and low signals is created. The width of the interference fringes is set by the separation of the two dishes, which is why the position can be determined so accurately. The radio astronomy group in Australia devised an ingenious version of this idea. They placed an antenna on a sea cliff, facing east. As a radio source rose, the radio radiation would reach the antenna directly at a shallow angle but also traveling a slightly longer path by reflection off the sea's surface. The antenna and its "mirror image" were the two elements of the interferometer.

19- Quoted in the editor's introduction to *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse: Proceedings of the First Texas Symposium on Relativistic Astrophysics,* edited by I. Robinson, A. Schild, and E.L. Schucking (Chicago: University of Chicago Press, 1965).

20- Quoted in J. Pfeiffer, *The Changing Universe* (London: Victor Gollancz, 1956).

21- A. Alfven and N. Herlofson, "Cosmic Radiation and Radio Stars," *Physical Review* 78 (1950): 616. Other early papers were G. R. Burbidge, "On Synchrotron Radiation from Messier 87," *Astrophysical Journal* 124 (1956): 416-29, and V. L. Ginzburg and I. S. Syrovaskii, "Synchrotron Radiation," *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 3 (1965): 297-350.

22- Substantial technical problems had to be overcome to match strong radio sources to optical counterparts. Different radio surveys didn't always agree on the strength or even the existence of a particular source. Radio sources have angular sizes that range from tens of arc minutes down to a few arc seconds, and what's seen with an interferometer depends on the number of elements in the array and their spacing, as well as the frequency of observation. Also, the number of radio sources in any particular area of sky increases quite rapidly with decreasing radio flux. That means there can be multiple sources near the limit of detection that conspire to look like a single, stronger source. This is called the "confusion limit" of a survey.

23- C. Hazard, M. B. Mackey, and A. J. Shimmins, "Investigation of the Radio Source 3C 273 by the Method of Lunar Occultations," *Nature* 197 (1963): 1037-39; M. Schmidt, "3C 273: A Star-like Object with Large Redshift," *Nature* 197 (1963): 1040; J. B. Oke, "Absolute Energy Distribution in the Optical Spectrum of 3C 273," *Nature* 1987 (1963): 1040-41; and J. L. Green- stein and T. A. Matthews, "Redshift of the Unusual Radio Source: 3C 48," *Nature* 197 (1963): 1041-42. For a modern summary of the chronology, see C. Hazard, D. Jauncey, W. M. Goss, and D. Herald, "The Sequence of Events that led to the 1963 Publications in Nature of 3C 273, the first Quasar and the first Extragalactic Radio Jet," in *Proceedings of*

IAU Symposium 313, edited by F. Massaro et al. (Dordrecht: Kluwer, 2014).

24- Interview with Maarten Schmidt on the fiftieth anniversary of his discovery, http://www.space.com/20244-quasar-mystery-discoverer-interview.html.

25- In fact, Australian radio astronomer John Bolton and American astronomer Allan Sandage each had a spectrum of 3C 48 in 1960, and both narrowly missed making the first quasar discovery three years before Schmidt.

26- Cosmological redshift is physically distinct from a Doppler shift. Doppler shift occurs when a wave travels in a medium and the source of the wave is moving with respect to the observer. The common example is a siren that rises in pitch when a police car is approaching and falls in pitch when the car is receding. Cosmological redshift does not require a medium, because the change in wavelength is caused by the expansion of space-time everywhere in the universe.

27- Cosmology broadens the Copernican principle, the idea that we don't occupy a privileged location in the Solar System, to the whole universe. It's a fundamental assumption of modern cosmology that hasn't been violated by any observation so far. The galaxies near the Milky Way don't appear to be any different, or distributed differently, from galaxies in remote parts of the universe.

28- Hubble's law is $v = H_0 D$, where v is the recession velocity, D is the distance, and the constant of proportionality is the Hubble constant, or the current expansion rate of the universe. The low redshift approximation in terms of the recession velocity and the speed of light is $z = v/c$. The correct relativ- istic formula is z = V(i + v/c)/(1 - v/c).

29- M. Schmidt, "Large Redshifts of Five Quasi-Stellar Sources," *Astro-physical Journal* 141 (1965): 1295-1300.

30- F. Zwicky and M. A. Zwicky, *Catalogue of Selected Compact Galaxies and of Post-Eruptive Galaxies* (Guemligen, Switzerland: Zwicky, 1971). The paper that raised his ire was A. Sandage, "The Existence of a Major New Constituent of the Universe: The Quasi-Stellar Galaxies," *Astrophysical Journal* 141 (1965): 156068. The episode is recounted in K.I. Kellerman, "The Discovery of Quasars and its Aftermath" *Journal of Astronomical History and Heritage* 17 (2014): 267-82.

31- The next phase of giant telescope building is as fiercely competitive as the last phase. Each of the 20-meter or larger telescopes planned will cost a billion dollars or more. The Giant Magellan Telescope is on the inside track, with five of the seven mirrors already cast at the University of Arizona, and a mountaintop scraped off and construction started in Chile. The Caltech project to build a 30-meter telescope was stalled due to opposition on Mauna Kea from native Hawaiian activists, but is now back on track. The 39-meter telescope of the European Southern Observatory will also go to Chile, and it is well funded by international agreements among the mostly European partners. The dark horse in the race is China, which may leapfrog over the 8-10-meter class to build another giant telescope on the Tibetan plateau.

32- The Seyfert calculation was presented in L. Woltjer, "Emission Nuclei in Galaxies," *Astrophysical Journal* 130 (1959): 38-44. The energy calculation for radio galaxies was presented in G. Burbidge, "Estimates of the Total Energy and Magnetic Field in the Non-Thermal Radio Sources," *Astrophysical Journal* 129 (1959): 849-52.

33- V. Ambartsumian, "On the Evolution of Galaxies," in *The Structure and Evolution of the Universe,* edited by R. Stoops (Brussels: Coudenberg, 1958), 241-74.

34- E. Salpeter, "Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects," *Astro- physical Journal* 140 (1964): 796-800; Ya. B.

Zel-dovich, "On the Power Source for Quasars," *Soviet Physics Doklady* 9 (1964): 195-205.

35- The main proponents of noncosmological redshifts in the 1960s and through the 1970s were Halton Arp and Bill Tifft on the observational side and Fred Hoyle and Geoff Burbidge on the theoretical side. The quasar redshift "controversy" was the subject of heated debate at conferences, with little agreement between the two sides. The debate was largely settled in favor of the cosmological interpretation by the 1980s, but even now there are some researchers who claim quasars are not at the distances indicated by their redshifts. The observational arguments can be seen in H. C. Arp, "Quasar Redshifts," *Science* 152 (1966): 1583, and the theoretical argument can be seen in G. Burbidge and F. Hoyle, "The Problem of the Quasi-Stellar Objects," *Scientific American* 215 (1966): 40-52.

36- All the radio emission is from electrons emitting synchrotron radiation in a hot but diffuse plasma. The energy transport must be very efficient to reach so far beyond the galaxy. The lobes present the places where relativistic particles "hit" the diffuse intergalactic medium, often creating hot spots of enhanced emission. The hot plasma is threaded by magnetic fields which means the radio emission has linear polarization.

37- D. S. De Young, *The Physics of Extragalactic Radio Sources* (Chicago: University of Chicago Press, 2002).

38- The discovery papers were A. R. Whitney et al., "Quasars Revisited: Rapid Time Variations Observed Via Very Long Baseline Interferometry," *Science* 173 (1971): 225-30, and M. H. Cohen et al., "The Small Scale Structure of Radio Galaxies and Quasi-Stellar Sources at 3.8 Centimeters," *Astrophysical Journal* 170 (1971): 207-17. Apparent superluminal motion had been predicted, based on theoretical arguments, five years earlier, in M. J. Rees, "Appearance of Rel- ativistically Expanding Radio Sources," *Nature* 211 (1966): 468-70.

39- A.-K. Baczko et al., "A Highly Magnetized Twin-Jet Base Pinpoints a Super- massive Black Hole," *Astronomy and Astrophysics* 593 (2016): A47-58.

40- The ionized regions around stars also show strong emission lines, but the lines in Seyfert spectra require a lot of ultraviolet radiation to be excited, more than can be generated by young stars. Spectroscopy was used to classify Seyferts as either Type 1, with very broad emission lines indicating gas motions up to 5% of the speed of light, or Type 2, with narrower emission lines. Seyferts 1s are generally more luminous than the Seyfert 2s, and there's even an intermediate class of Seyfert 1.5 galaxies, where the emission lines have weak broad wings superimposed on strong narrow cores. Astronomers also found a category of galaxies with low excitation nuclear emission lines, or LINERs, which are more active than a normal galaxy but less active than a Seyfert galaxy. Yes, the taxonomy of active galaxies is complex and confusing.

41- This type of observation of quasar "host galaxies" in the 1990s helped lay to rest the claim that quasar redshifts were noncosmological. There was a continuum of active nuclei ranging from mild ones nearby to very remote and luminous ones, where the data was consistent with them living in a galaxy at the distance indicated by the redshift in an expanding universe. Meanwhile, some of the evidence for noncosmological redshifts evaporated. There was no excess of redshifts at particular values, the distribution was smooth, and apparent associations of high redshift quasar with low redshift galaxies were shown to be coincidences and not indicative of a physical connection.

42- R. D. Blandford and M. J. Rees, "Some Comments on the Radiation Mechanism in Lacertids," in *Pittsburgh Conference on BL Lac Objects,* edited by A.M. Wolfe (Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1978).

43- C. S. Bowyer et al., "Detection of X-Ray Emission from 3C 273 and NGC 5128," *Astrophysical Journal* 161 (1970): L1-L7.

44- The first sensitive study of quasar X-ray emission was H. Tananbaum et al., "X-Ray Studies of Quasars with the Einstein Observatory," *Astrophysical Journal* 234 (1979): L9-13. Greg Shields was the first to suggest that quasar UV emission was due to an accretion disk, in G. A. Shields, "Thermal Emission from Accretion Disks in Quasars," *Nature* 272 (1978): 706-08. Matt Malkan was the first to derive detailed accretion disk models, in M. A. Mal- kan, "The Ultraviolet Excess of Luminous Quasars: II. Evidence for Massive Accretion Disks," *Astrophysical Journal* 268 (1983): 582-90.

45- D. B. Sanders et al., "Continuum Energy Distribution of Quasars - Shapes and Origins," *Astrophysical Journal* 347 (1979): 29-51.

46- IceCube Collaboration, "Neutrino emission from the Direction of the Blazar TXS 0506+056 Prior to the IceCube-170922A Alert," *Science* 361 (2018), 147-51.

47- I did my PhD on blazars, and I was drawn to them because they offered the clearest view of the maelstrom. At each observing run, I had a "hot list" of several dozen targets where monitoring with small telescopes had shown signs of unusual activity. Sometimes the target was a bust, the light trace as flat as a millpond. Other times, the central black hole was gorging on gas and stars and cranking out high-energy radiation and electrons traveling at 99.999% of the speed of light. Like Poe's fictional narrator, I was drawn by the terrible beauty of a deep and unforgiving gravitation pit.

48- M. A. Orr and I. W. A. Browne, "Relativistic Beaming and Quasar Statistics," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 200 (1982): 1067-80. A relativistic jet oriented

close to the line of sight can easily have its flux boosted by a factor of 1,000. The counter-jet is moving rapidly away from the observer so is de-amplified; the result for the observer is a one-sided jet. Extended radio emission is not part of a relativistic flow so its flux is unaffected.

49- The progress of this idea can be followed in two review articles separated by more than twenty years: R. R. J. Antonucci, "Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars," *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 31 (1993): 473-521; and H. Netzer, "Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei," *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* (2015): 365-408.

الفصل الرابع: محركات الجاذبية

1- The most famous representation of this myth is Tintoretto's *The Origin of the Milky Way* (1575), in the National Gallery in London. Most people in Western countries live in cities and suburbs and their view of the Milky Way is obscured by light pollution. When I survey millennials in large classes I teach at the University of Arizona, typically only 10% have ever seen the Milky Way.

2- Z. M. Malkin, "Analysis of Determinations of the Distance between the Sun and the Galactic Center," *Astronomy Reports* 57 (2013): 128-33.

3- W. M. Goss, R. L. Brown, and K. Y. Lo, "The Discovery of Sgr A*," in "Proceedings of the Galactic Center Workshop - The Central 300 Parsecs of the Milky Way," *Astronomische Nachrichen*, supplementary issue 1 (2003): 497-504.

4- M. J. Rees, "Black Holes," *Observatory* 94 (1974): 168-79.

5- Infrared detectors were often developed for military applications like nighttime battlefield imaging and heat-tracking of

missiles, which slowed their adoption in the civilian and research sectors. Also, infrared imaging must deal with thermal background radiation that is millions of times higher than the optical radiation from a dark night sky. For the overall history of the subject, see G. H. Rieke, "History of Infrared Telescopes and Astronomy," *Experimental Astronomy* 125 (2009): 125-41. For a history of detector development, see A. Rogalski, "History of Infrared Detectors," *Opto-Electronics Review* 20 (2012): 279-308. Optical astronomy took its big leap forward in the late 1970s when charged coupled devices (CCDs) migrated from research labs to astronomical use.

6- The crowding of images in a dense region of stars, or the smooth distribution of light in a galaxy image, is the result of images that are far bigger than the stars themselves. Starlight is blurred by a particular amount when it passes through the Earth's atmosphere, regardless of the size of the source of light. Stars in our part of the Milky Way are widely separated and almost never collide; the distances between them are millions of times larger than their sizes. Even in the central part of the Milky Way, the distances between stars are tens of thousands of times larger than their sizes and they almost never collide.

7- From the German group, A. Eckart and R Genzel, "Observations of Stellar Proper Motions Near the Galactic Centre," *Nature* 383 (1996): 415-17, and A. Eckart and R. Genzel, "Stellar Proper Motions in the Central 0.1 pc of the Galaxy," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 28 (1997): 576-98; and from the American group, A. M. Ghez, B. L. Klein, M. Morris, and E. E. Becklin, "High Proper Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of our Galaxy," *Astrophysical Journal* 509 (1998): 678-86.

8- Quoted in http://www.pbs.org/wgbh/nova/space/andrea-ghez.html.

9- Reinhard Genzel explains why it's so important to have a massive black hole on our doorstep, thousands of times closer than any other active galaxy or quasar: "The center of our galaxy is a unique laboratory where we can study the fundamental processes of strong gravity, stellar dynamics, and star formation that are of great relevance to all other galactic nuclei, and with a level of detail that will never be possible beyond our Galaxy." Quoted in http://www.universetoday.com/22104/beyond-any-reasonable-doubt-a-supermassive-black-hole-lives-in-centre-of-our-galaxy/.

10- Andrea Ghez left behind the tentativeness of a young researcher long ago. She's a superstar and a role model for young women in astronomy. Ghez was elected to the National Academy of Sciences before she turned forty, and in 2008 was awarded a MacArthur Fellowship, colloquially known as the "genius prize." She's unaffected by all the celebrity and enjoys talking about having as much fun as when she solved puzzles as a young child: "Research is a wonderful career, because once you've started to work on one question, what you find is not only the answer to the first question but new puzzles. I think that's what keeps me going, there are always open questions, new puzzles."

11- F. Roddier, *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004).

12- A. M. Ghez et al., "Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Supermassive Black Hole with Stellar Orbits," *Astrophysical Journal* 689 (2008): 1044-62; and S. Gillesen et al., "Monitoring Stellar Orbits Around the Massive Black Hole in the Galactic Center," *Astrophysical Journal* 692 (2009): 1075-1109.

13- S. Gillesen et al., "A Gas Cloud on its Way Towards the Supermassive Black Hole in the Galactic Centre," *Nature* 481 (2012): 51-54.

14- S. Doeleman et al., "Event-Horizon Scale Structure in the Supermassive Black Hole Candidate at the Galactic Centre," *Nature* 455 (2008): 78-80.

15- A. Boehle et al., "An Improved Distance and Mass Estimate for Sgr A* from Multistar Orbit Analysis," *Astrophysical Journal*, 830 (2016): 17-40.

16- M. Schmidt, "The Local Space Density of Quasars and Active Nuclei," *Phys- ica Scripta* 17 (1978): 135-36.

17- D. Lynden-Bell, "Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars," *Nature* 223 (1969): 690-94.

18- The formula for the gravitational influence radius is $R = GM/v^2$, where M is the black hole mass in solar masses and v is the dispersion or spread in velocities of stars within that radius, caused by both the black hole and the stars themselves. Based on the observed scaling relations between black hole mass and stellar velocity dispersion, this becomes $R \sim 35\ (M/10^9)^{1/2}$ parsecs.

19- Combining the formula for the gravitational radius $R = GM/v^2$ with the formula for the Schwarzschild radius $R,, = GM/c^2$ leads to $R/R,, = (c/v)^2$, which is about 10^6 for a massive galaxy, where v = 200-300 kilometers per second.

20- R. F. Zimmerman, *The Universe in a Mirror: The Saga of the Hubble Space Telescope and the Visionaries Who Built It* (Princeton: Princeton University Press, 2010).

21- I used Hubble back when it was first launched and many times since. "Used" is a euphemism, since even experienced astronomers don't get to move the telescope around and watch as faint galaxies swim into view. With a price tag of $8 billion, it's far too valuable to risk a malfunction caused by a careless user. After getting allocated orbits in a fiercely competitive review process, astronomers submit their target lists and an AI scheduling algorithm interleaves them to minimize energy

use, instrument changes, and time spent slewing the telescope. A few weeks later the reduced data is available to download from a secure website. Not very romantic, alas.

22- Inevitably, there are complications and subtleties. Galaxies are threedimensional objects, so three-dimensional space motions project down to two dimensions on the plane of the sky, and a spectrograph slit can only sample a one-dimensional map of the dispersion in velocities. As a result, the data has to be modeled and assumptions are made in the analysis. Different slit orientations can be used to get close to a two-dimensional velocity map, but that requires a lot of coveted telescope time for each galaxy.

23- L. Ferrarese and D. Merritt, "Supermassive Black Holes," *Physics World* 15 (2002): 41-46; and L. Ferrarese and H. Ford, "Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present, and Future," *Space Science Reviews* 116 (2004): 523-624.

24- R. Bender et al., "HST STIS Spectroscopy of the Triple Nucleus of M31: Two Nested Disks in Keplerian Motion around a Supermassive Black Hole," *Astrophysical Journal* 631 (2005): 280-300.

25- R. P. van der Marel, P. T. de Zeeuw, H.-W. Rix, and G. D. Quinlan, "A Massive Black Hole at the Center of the Quiescent Galaxy M32," *Nature* 385 (1997): 610-12.

26- K. Gebhardt and J. Thomas, "The Black Hole Mass, Stellar Mass-to- Light Ratio, and Dark Halo in M87," *Astrophysical Journal* 700 (2009): 1690-1701.

27- M. C. Begelman, R. D. Brandford, and M. J. Rees, "Theory of Extragalactic Radio Sources," *Reviews of Modern Physics* 56 (1984): 255-351.

28- R. D. Blandford, H. Netzer, and L. Woltjer, *Active Galactic Nuclei* (Berlin: Springer, 1990).

29- M. C. Begelman and M. J. Rees, "The Fate of Dense Stellar Systems," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 185 (1978): 847-60; and M. C. Begelman and M. J. Rees, *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009).

30- P. Khare, "Quasar Absorption Lines: an Overview," *Bulletin of the Astronomical Society of India* 41 (2013): 41-60.

31- W. L. W. Sargent, "Quasar Absorption Lines and the Intergalactic Medium," *Physica Scripta* 21 (1980): 753-58.

32- D. H. Weinberg, R. Dave, N. Katz, and J. Kollmeier, "The Lyman-Alpha Forest as a Cosmological Tool," in *The Emergence of Cosmic Structure,* AIP Conference Series 666, edited by S. Holt and C. Reynolds, 2003, 157-69.

33- In the theory of lensing, there are always an odd number of images, some magnified and some demagnified. The most common lensing geometry creates a pair of magnified images and a demagnified image that's usually too faint to detect, so a pair of images is seen. If the mass distribution of the lensing object is complex, higher image multiplicities are possible, so astronomers have seen 4-image, 6-image, and even 10-image lensed quasars. For a summary of the phenomenon, see T. Sauer, "A Brief History of Gravitational Lensing," Einstein Online, Volume 4, 2010, http://www.einstein-online.info/spotlights/grav_lensing_history.

34- The U.K. Schmidt is well described by former staff member Fred Watson in *Stargazer: Life and Times of the Telescope* (London: Allen and Unwin, 2004). See also a summary at https://www.aao.gov.au/about-us/uk-schmidt-telescope-history.

35- M. Miyoshi et al., "Evidence for a Black Hole from High Rotation Velocities in a Sub-Parsec Region of NGC4258," *Nature* 373 (1995): 127-29.

36- A. J. Baarth et al., "Towards Precision Black Hole Masses with ALMA: NGC 1332 as a Case Study in Molecular Disk Dynamics," *Astrophysical Journal* 823 (2016): 51-73.

37- B. M. Peterson, "The Broad Line Region in Active Galactic Nuclei," *Lecture Notes in Physics* vol. 693 (Berlin: Springer, 2006), 77-100.

38- There are many details and complications involved in making a reliable mass estimate. The fast-moving gas that gives the emission lines is in clouds rather than being smoothly distributed, and clouds of different densities and distance from the black hole emit different emission lines. The geometry of the gas affects the time delay signal. For example, a ringlike geometry of gas has a constant time delay surface that's a parabola. A more complicated 3D geometry for the gas makes the analysis challenging. Uneven sampling of the variability due to the vagaries of weather and telescope scheduling create more headaches. Up to 100 astronomers may be involved in one of these intense reverberation mapping campaigns, all to bag a handful of black hole masses.

39- M. C. Bentz et al., "NGC 5548 in a Low-Luminosity State: Implications for the Broad-Line Region," *Astrophysical Journal* 662 (2007): 205-12.

40- B. M. Peterson and K. Horne, "Reverberation Mapping of Active Galactic Nuclei," in *Planets to Cosmology: Essential Science in the Final Years of the Hubble Space Telescope,* edited by M. Livio and S. Casertano (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004).

41- The methods are summarized in B. M. Peterson, "Measuring the Masses of Supermassive Black Holes," *Space Science Review* 183 (2014): 253-75. A large quantity of data is presented in A. Refiee and P. B. Hall, "Supermassive Black Hole Mass Estimates Using Sloan Digital Sky Survey Quasar Spectra at

$0.7 < z < 2$," *Astrophysical Journal Supplements* 194 (2011): 42-58.

42- To put this number in perspective, world energy consumption is about 20 terawatts, which is a million billion billion times (10^{26}) less power than is pumped out by a quasar.

43- J. Updike, "Ode to Entropy," in *Facing Nature* (New York: Knopf, 1985).

44- The fundamental physical distinction is between a thermal process and a nonthermal process. In a thermal process, the physical system is in equilibrium and has a characteristic temperature. In this case, it emits blackbody radiation over a range of wavelengths but with a well-defined peak where the wavelength of the peak emission is inversely proportional to temperature (Wein's law). In a nonthermal process, the physical system is out of equilibrium and has no characteristic temperature. Radiation is emitted over a very broad range of wavelengths, typically with a power law energy distribution. Synchrotron radiation is an example of nonthermal radiation, as in the radio emission from active galaxies and quasars.

45- A. Prieto, "Spectral Energy Distribution Template of Redshift-Zero AGN and the Comparison with that of Quasars," in *Astronomy at High Angular Resolution,* Journal of Physics Conference Series, vol. 372 (London: Institute of Physics, 2012), 1-5.

46- X. Barcons, *The X-Ray Background* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992).

47- A. Moretti et al., "Spectrum of the Unresolved Cosmic X-Ray Background: What is Unresolved 50 Years after its Discovery?" *Astronomy and Astrophysics* 548 (2012): 87-99.

48- Some of the most common misconceptions are dealt with neatly by Phil Plait, a.k.a. the Bad Astronomer, on his blog for *Discover,* http://blogs.discovermagazine.com/badastron-

omy/2008/10/30/ten-things-you-dont-know-about-black-holes/-.WEoS2horJdg.

الفصل الخامس: حيوات الثقوب السوداء

1- B. J. Carr and S. Hawking, "Black Holes in the Early Universe," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 168 (1974): 399-415.

2- The Planck time is part of a system of units often used in particle physics and cosmology, where measurement is defined entirely in terms of fundamental constants and not human-derived constructs. By convention, physical constants take values of 1 when calculating in Planck units. Planck units describe a situation where the standard quantum theory and general relativity cannot be reconciled, and a quantum gravity theory is needed. This occurs at the Planck energy of 10^{19} GeV.

3- The alternative to hypothesizing dark matter is to say that Newton's law of gravity is wrong. If the gravity force didn't depend exactly on the inverse square of the distance, it would be possible to explain away the need for dark matter. But the price paid would be high. Newton's law of gravity is preeminent in explaining weak gravity in the Solar System and beyond, and altering the force law destroys the symmetry and elegance of the theory. Various alternative gravity theories have been explored, but none passes the high bar cleared by Newton's theory. Astronomers have accepted that dark matter is a major component of the universe, and major efforts are devoted to figuring out its physical nature.

4- P. Pani and A. Loeb, "Exclusion of the Remaining Mass Window for Primordial Black Holes as the Dominant Constituent of Dark Matter," *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, issue 6 (2014): 26.

5- S. Singh, *Big Bang: The Origin of the Universe* (New York: Harper Perennial, 2005).

6- J. Miralda-Escude, "The Dark Age of the Universe," *Science* 300 (2003): 1904-09.

7- A. Loeb, "The Habitable Epoch of the Early Universe," *International Journal of Astrobiology* 13 (2014): 337-39.

8- While astronomers don't know the physical nature of dark matter, there's a huge body of evidence saying that invisible mass exists throughout the universe and acts to hold galaxies together. Simulations of structure formation don't generate anything like the real universe unless dark matter is an ingredient. The requirement is for "cold dark matter," where cold means the particle was moving at nonrelativistic speeds when stable atoms formed (otherwise, structures would be erased). The foundational paper is G. R. Blu- menthal et al., "Formation of Galaxies and Large-Scale Structures with Cold Dark Matter," *Nature* 31 (1984): 517-25.

9- V. Bromm et al., "Formation of the First Stars and Galaxies," *Nature* 459 (2009): 49-54; and A. Loeb, *How Did the First Stars and Galaxies Form* (Princeton: Princeton University Press, 2010).

10- D. G. York et al., "The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary," *Astronomical Journal* 120 (2000): 1579-87.

11- E. Chaffau et al., "A Primordial Star in the Heart of the Lion," *Astronomy and Astrophysics* 542 (2012): 51-64.

12- G. Schilling, *Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002).

13- R. W. Klebasadel, I. B. Strong, and R. A. Olsen, "Observations of Gamma Ray Bursts of Cosmic Origin," *Astrophysical Journal Letters* 182 (1973): L85-89.

14- J. S. Bloom et al., "Observations of the Naked Eye GRB 080319B: Implications of Nature's Brightest Explosion," *Astrophysical Journal* 691 (2009): 723-37.

15- N. Tanvir et al., "A Gamma Ray Burst at a Redshift of z = 8.2," *Nature* 461 (2009): 1254-57.

16- Hunting gamma ray bursts involves a network of telescopes, so that the largest telescope with clear weather can look for an optical counterpart. It's exciting work, but the yield is small. Out of over 5,000 gamma ray bursts in the past fifteen years, less than twenty have been observed quickly enough or had a bright enough optical counterpart for a redshift to be measured.

17- N. Gehrels and P. Meszaros, "Gamma Rays Bursts," *Science* 337 (2012): 932-36.

18- S. Dong et al., "ASASSN-15lh: A Highly Super-Luminous Supernova," *Science* 351 (2016): 257-60.

19- A. L. Melott et al., "Did a Gamma Ray Burst Initiate the Late Ordovician Mass Extinction?" *International Journal of Astrobiology* 3 (2004): 55-61. Also, B. C. Thomas et al., "Gamma Ray Bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic, and Biogeochemical Effects," *Astro- physical Journal* 634 (2005): 509-33.

20- V. V. Hambaryan and R. Neuhauser, "A Galactic Short Gamma Ray Burst as Cause for the Carbon-14 Peak in AD 774/775," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 430 (2013): 32-36.

21- The physical nature of ULX sources is controversial. They might be accreting black holes, but some of them may be accreting neutron stars. Also, theorists have proposed ways that black holes can be "force fed" and so radiate beyond the Eddington limit, which in turn would mean the black hole need not be so massive. Evidence that a ULX in the nearby gal-

axy M82 is an intermediate-mass black hole is given in D. R. Pasham, T. E. Strohmayer, and R. F. Mushotzky, "A 400-Solar-Mass Black Hole in the Galaxy M82," *Nature* 513 (2014): 74-76.

22- D. H. Clark, The Quest for SS433 (New York: Viking, 1985).

23- I. F. Mirabel and R. F. Rodriguez, "Microquasars in our Galaxy," Nature 392 (1998): 673-76.

24- L. Ferrarese and D. Merritt, "A Fundamental Relation Between Supermas- sive Black Holes and Their Host Galaxies," Astrophysical Journal Letters 539 (2000): L9-12; and K. Gebhardt et al., "A Relationship Between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion," Astrophysical Journal Letters 539 (2000): L13-16. This relation was extended to lower-mass dwarf galaxies, both active and inactive, by Jenny Greene and collaborators.

25- T. Oka et al., "Signature of an Intermediate-Mass Black Hole in the Central Molecular Zone in our Galaxy," Astrophysical Journal Letters 816 (2015): L7-12.

26- R. Geroch, General Relativity from A to B (Chicago: University of Chicago Press, 1981). An excellent set of introductory-level articles can be found at http://www.einstein-online.info/.

27- For a site that tracks the world's fastest 500 computers, and other trends in processor power and computation, see https://www.top500.org/.

28- M. W. Choptuik, "The Binary Black Hole Grand Challenge Project," in *Computational Astrophysics,* edited by D.A. Clarke and M.J. West, ASP Conference Series #123, 1997, 305. This was followed by J. Baker, M. Cam- panelli, and C. O. Lousto, "The Lazarus Project: A Pragmatic Approach to Binary Black Hole Evolutions," *Physical Review D* 65 (2002): 044001-16.

29- J. Healy et al., "Superkicks in Hyperbolic Encounters of Binary Black Holes," *Physical Review Letters* 102 (2009): 041101-04.

30- The following paper is not for the faint of heart: R. Gold et al., "Accretion Disks Around Binary Black Holes of Unequal Mass: General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Postdecoupling and Merger," *Physical Review D* 90 (2014): 104031-45.

31- I saw another side of Simon White while he was my colleague on the astronomy faculty at the University of Arizona. Simon was the go-to guy on any topic in cosmology; his expertise was both wide and deep. He had the skill of transferring to you his physical intuition. I often left a conversation with him thinking I was smarter than I was. He retained several quirks that marked him out as a native Brit. The most striking was on display one evening when I went to his house for a pot-luck dinner. After the food was finished, table and chairs were pushed to the side, and Simon led out a group of men wearing bells on their shins, knotted handkerchiefs on their heads, and carrying sticks. What followed was Morris dancing, an unbroken tradition since Shakespearean times in the small town in Kent where Simon was born. I grew up in Britain but never imagined I'd see Morris dancing in the Sonoran Desert.

32- E. Bertschinger, "Simulations of Structure Formation in the Universe," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 36 (1998): 599-654.

33- These methods reduce the computational load for N particles from N^2 to N logN. So for a million particles, there are 6 million calculations, and for 10 billion particles there are 10 million calculations.

34- J. J. Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics," *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 30 (2002): 543-74.

35- See interview with Simon White at http://www.drillings-raum.com/simon- white/simon-white-1.html.

36- V. Springel et al., "Simulations of the Formation, Evolution, and Clustering of Galaxies and Quasars," *Nature* 435 (2005): 629-36.

37- M. Vogelsberger et al., "Properties of Galaxies Reproduced by a Hydrody- namical Simulation," *Nature* 509 (2014): 177-82.

38- See interview with Simon White at http://www.drillings-raum.com/simon- white/simon-white-4.html.

39- The only galaxies visible to the naked eye are the spiral Andromeda or M31 in the north, and the Large and Small Magellanic Clouds, two dwarf galaxies visible in the south. With the large fraction of people living in cities and suburbs and being unfamiliar with the night sky, most people have never seen another galaxy.

40- E. Banados et al., "An 800-Million-Solar-Mass Black Hole in a Significantly Neutral Universe at a Redshift of 7.5," *Nature,* December 6, 2017, doi:10.1038/ nature25180. The previous record-holder was D. J. Mortlock et al., "A Luminous Quasar at a Redshift of z = 7.085," *Nature* 474 (2011): 616-19

41- J. L. Johnson et al., "Supermassive Seeds for Supermassive Black Holes," *Astrophysical Journal* 771 (2013): 116-25.

42- A. C. Fabian, "Observational Evidence of AGN Feedback," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 50 (2012): 455-89.

43- The phenomenon where small galaxies form before large galaxies, while large black holes form before smaller black holes, is called cosmic downsizing. The reason is that the accepted view of galaxy evolution is that small galaxies form first and merge to form larger galaxies. Black holes take a different

route, the largest ones growing quickly and the more abundant smaller ones growing slowly and later. Downsizing refers to the tendency for most black holes to grow slowly and stay relatively small. For a review from the simulation standpoint, see P. F. Hopkins et al., "A Unified, Merger- Driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids," *Astrophysical Journal Supplement* 163 (2006): 1-49. For the observational perspective, see M. Volonteri, "The Formation and Evolution of Massive Black Holes," *Science* 337 (2012): 544-47.

44- H. Lineweaver and T. M. Davis, "Misconceptions About the Big Bang," *Scientific American,* March 2005, 36-45.

45- See Ned Wright's cosmology FAQ at http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html.

46- N. J. Poplawski, "Cosmology with Torsion: An Alternative to Cosmic Inflation," *Physics Letters B* 694 (2010): 181-85.

47- R. Pourhasan, N. Afshordi, and R. B. Mann, "Out of the White Hole: A Holographic Origin for the Big Bang," *Journal of Cosmology and Astropar- ticle Physics,* issue 4 (2014): 5-22. A popular version, and the source of the quote, is N. Afshordi, R. B. Mann, and R. Pourhasan, "The Black Hole at the Beginning of Time," *Scientific American,* August 2014, 37-43.

48- J. Tanaka, T. Yamamura, and J. Kanzaki, "Study of Black Holes with the Atlas Detector at the LHC," *European Physical Journal C* 41 (2005): 19-33.

49- CMS Collaboration, "Search for Microscopic Black Hole Signatures at the Large Hadron Collider," *Physics Letters B* 697 (2011): 434-53.

50- B. Koch, M. Bleicher, and H. Stocker, "Exclusion of Black Hole Disaster Scenarios at the LHC," *Physics Letters B* 672 (2009): 71-76.

51- See Ethan Siegel's blog at http://www.forbes.com/sites/startswithabang/2016/03/11/could-the-lhc-make-an-earth-killing-black-hole/#6b465d245837.

52- L. Crane and S. Westmoreland, "Are Black Hole Starships Possible?," 2009, https://arxiv.org/abs/0908.1803.

الفصل السادس: الثقوب السوداء كاختبارات للجاذبية

1- J. Lequeux, *Le Verrier: Magnificent and Detestable Astronomer* (New York: Springer, 2013). Le Verrier beat English astronomer James Couch Adams to the discovery by only a few days, although Adams completed his work earlier. Le Verrier was so unpopular as director of the Paris Observatory that he was driven out of the job, but he regained the position after his successor accidentally drowned. A contemporary said of him, "I do not know whether M. Le Verrier is actually the most detestable man in France, but I am quite certain he is the most detested." In a fascinating historical twist, Galileo missed the discovery of Neptune over 200 years earlier. In 1613, he noticed a bright object close to Jupiter, but assumed it was a star. He even noticed the object move slightly. However, the following nights were cloudy so Galileo missed making the observations that would have made it clear that he was seeing a planet.

2- R. Baum and W. Sheehan, *In Search of Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Machine* (New York: Plenum Press, 1997).

3- W. Isaacson, *Einstein: His Life and Universe* (New York: Simon & Schuster, 2007).

4- G. Musser, *Spooky Action at a Distance: The Phenomenon That Reimagines Space and Time—And What It Means for Black Holes, the Big Bang, and Theories of Everything* (New

York: Farrar, Straus and Giroux, 2015). See also the more technical but masterful T. Maudlin, Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics (Oxford: Wiley-Blackwell, 2011).

5- R. Oerter, *The Theory of Almost Everything: The Standard Model, the Unsung Triumph of Modern Physics* (New York: Penguin, 2006).

6- L. Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space, Time, and the Universe* (New York: Basic Books, 2001).

7- Quoted in F. S. Perls, *Gestalt Therapy Verbatim* (Gouldsboro, ME: Gestalt Journal Press, 1992).

8- Quoted in R. P. Feynman, *The Character of Physical Law* (New York: Penguin, 1992).

9- When Einstein first calculated the effect in 1911, he mistakenly calculated a deflection angle the same as for Newton's theory. Luckily for him and his reputation, an expedition planned for 1914 to watch starlight bend past the Sun during a solar eclipse was disrupted by the outbreak of World War I and observers already in place to watch the eclipse were captured by Russian soldiers. The correct deflection angle is twice the Newtonian value.

10- F. W. Dyson, A. S. Eddington, and C. Davidson, "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of 29 May, 1919," *Philosophical Transactions of the Royal Society* 220A (1920): 291-333.

11- A. Calaprice, ed., *The New Quotable Einstein* (Princeton: Princeton University Press, 2005).

12- Einstein, "Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field," *Science* 84 (1936): 506-07.

13- L. M. Krauss, "What Einstein Got Wrong," *Scientific American,* September 2015, 51-55.

14- F. Zwicky, "Nebulae as Gravitational Lenses," *Physical Review* 51 (1937): 290.

15- D. Walsh, R. F. Carswell, and R. J. Weymann, "0957+561 A, B: Twin Quasi- stellar Objects or Gravitational Lens?" *Nature* 279 (1979): 381-84.

16- The distance scale or the expansion rate of the universe is set by the slope of the relation between recession velocity and distance, $v = H_0 d$, where v is recession velocity, d is distance, and the slope of the relationship is the Hubble constant, H_0. Normally, the Hubble constant is measured by an overlapping chain of distance indicators, starting with parallax geometry for nearby stars, and extending through supernovas with well-calibrated peak brightness. Using gravitational lenses to measure the Hubble constant is direct and bypasses this entire chain of reasoning. Measuring a time delay in a lens system means the difference in distance between the two paths is measured. Since all the angles in the lens configuration are measured too, the entire geometry is determined, so giving the factor that relates distance and velocity or redshift.

17- J. N. Hewitt et al., "Unusual Radio Source MG 1131+0456: A Possible Einstein Ring?" *Nature* 333 (1988): 537-40.

18- There's a third form of gravitational lensing, in which light from distant galaxies is slightly distorted by all the dark matter along the line of sight. Think of the universe like a funhouse mirror where light doesn't travel in straight lines but undulates subtly due to the widely distributed dark matter. For an individual galaxy, the distortion is only 0.1%, too small to be detected, so it shows up when looking for patterns in the shapes of thousands of faint galaxies. For this reason it's referred to as statistical lensing. Statistical lensing demonstrates that space between galaxies is filled with dark matter.

19- U. I. Uggerhoj, R. E. Mikkelsen, and J. Faye, "The Young Center of the Earth," *European Journal of Physics* 37 (2016): 35602-10.

20- C. M. Will, "The Confrontation Between General Relativity and Experiment," *Living Reviews in Relativity* 9 (2006): 3-90.

21- R. V. Pound and G. A. Rebka, Jr., "Apparent Weight of Photons," *Physical Review Letters* 4 (1960): 337-41.

22- J. C. Hafele and R. E. Keating, "Around the World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains," *Science* 177 (1972): 168-70.

23- R. F. C. Vessot et al., "Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser," *Physical Review Letters* 45 (1980): 2081-84.

24- H. Muller, A. Peters, and S. Chu, "A Precision Measurement of the Gravitational Redshift by Interference of Matter Waves," *Nature* 463 (2010): 926-29.

25- R. Wojtak, S. H. Hansen, and J. Hjorth, "Gravitational Redshift of Galaxies in Clusters as Predicted by General Relativity," *Nature* 477 (2011): 567-69.

26 L. Huxley, *The Life and Letters of Thomas Henry Huxley* (London: MacMillan, 1900), 189.

27- I. I. Shapiro et al., "Fourth Test of General Relativity: New Radar Result," *Physical Review Letters* 26 (1971): 1132-35.

28- B. Bertotti, L. less, and P. Tortora, "A Test of General Relativity using Radio Links with the Cassini Spacecraft," *Nature* 425 (2003): 374-76.

29- E. Teo, "Spherical Photon Orbits around a Kerr Black Hole," *General Relativity and Gravitation* 35 (2003): 1909-26.

30- For a rapidly spinning black hole, the innermost stable circular orbit might be inside the photon sphere, which means that material there is unobservable.

31- C. S. Reynolds and M. A. Nowak, "Fluorescent Iron Lines as a Probe of Astrophysical Black Hole Systems," *Physics Reports* 377 (2003): 389-466.

32- Y. Tanaka et al., "Gravitationally Redshifted Emission Implying an Accretion Disk and Massive Black Hole in the Active Galaxy MCG-6-30-15," *Nature* 375 (1995): 659-61.

33- J. F. Dolan, "Dying Pulse Trains in Cygnus XR-1: Evidence for an Event Horizon," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 113 (2001): 974-82.

34- N. Shaposhnikov and L. Titarchuk, "Determination of Black Hole Masses in Galactic Black Hole Binaries Using Scaling of Spectral and Variability Characteristics," *Astrophysical Journal* 699 (2009): 453-68.

35- "Gravitational Vortex Provides New Way to Study Matter Close to a Black Hole," press release, European Space Agency, July 12, 2016, http://sci.esa.int/xmm-newton/58072-gravitational-vortex-provides-new-way-to-study-matter-close-to-a-black-hole/.

36- A. Ingram et al., "A Quasi-Periodic Modulation of the Iron Line Centroid Energy in the Black Hole Binary H1743-322," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461 (2016): 1967-80.

37- M. Middleton, C. Done, and M. Gierlinski, "The X-Ray Binary Analogy to the First AGN QPO," *Proceedings of the AIP Conference on X-Ray Astronomy: Present Status, Multi-Wavelength Approaches, and Future Perspectives* 1248 (2010): 325-28.

38- M. J. Rees, "Tidal Disruption of Stars by Black Holes of 10^6 - 10^8 Solar Masses in Nearby Galaxies," *Nature* 333 (1988): 523-28. This was the detailed development of an original idea from a decade earlier; see J. G. Hills, "Possible Power Source of Seyfert Galaxies and QSOs," *Nature* 254 (1975): 295-98.

39- S. Gezari, "The Tidal Disruption of Stars by Supermassive Black Holes," *Physics Today* 67 (2014): 37-42.

40- E. Kara, J. M. Miller, C. Reynolds, and L. Dai, "Relativistic Reverberation in the Accretion Flow of a Tidal Disruption Event," *Nature* 535 (2016): 388-90.

41- G. C. Bower, "The Screams of the Star Being Ripped Apart," *Nature* 351 (2016): 30-31.

42- G. Ponti et al., "Fifteen Years of XMM-Newton and Chandra Monitoring of Sgr A*: Evidence for a Recent Increase in the Bright Flaring Rate," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454 (2015): 1525-44.

43- Jacob Aron, "Black holes devour stars in gulps and nibbles," *New Scientist*, March 25, 2015, https://www.newscientist.com/article/mg22530144-400-black-holes-devour-stars-in-gulps-and-nibbles/.

44- Richard Gray, "Echoes of a stellar massacre," *Daily Mail,* September 16, http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3793042/Echoes-stellar-massacre-Gasps-dying-stars-torn-apart-supermassive-black-holes-detected.html.

45- C. W. F. Everitt, "The Stanford Relativity Gyroscope Experiment: History and Overview," in *Near Zero: Frontiers in Physics*, edited by J. D. Fairbank et al. (New York: W.H. Freeman, 1989).

46- Gravity Probe B is a great example of the perseverance and technology development required for many space missions. The concept stemmed from a theoretical paper written by Stanford professor Leonard Schiff in 1957. He and MIT professor George Pugh proposed the mission to NASA in 1961 and the project received its first funding in 1964. There followed forty years of technology development and delays caused by NASA's Shuttle program. Schiff and Pugh died long before the launch in 2004.

47- C. W. F. Everitt et al., "Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity," *Physical Review Letters* 106 (2011): 22101-06.

48- E. S. Reich, "Spin Rate of Black Holes Pinned Down," *Nature* 500 (2013): 135.

49- K. Middleton, "Black Hole Spin: Theory and Observations," in *Astrophysics of Black Hole, Astrophysics and Space Science Library,* volume 440 (Berlin, Springer, 2016), 99-137.

50- J. W. T. Hessels et al., "A Radio Pulsar Spinning at 716 Hz," *Science* 311 (2006): 1901-04.

51- L. Gou et al., "The Extreme Spin of the Black Hole in Cygnus X-1," *Astro- physical Journal* 742 (2011): 85-103.

52- M. J. Valtonen, "Primary Black Hole Spin in OJ 287 as Determined by the General Relativity Centenary Flare," *Astrophysical Journal Letters* 819 (2016): L37-43.

53- Quoted in Dennis Overbye, "Black Hole Hunters," *New York Times,* June 8, 2015, http://www.nytimes.com/2015/06/09/science/black-hole-event-horizon-telescope.html.

54- A. Ricarte and J. Dexter, "The Event Horizon Telescope: Exploring Strong Gravity and Accretion Physics," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 446 (2014): 1973-87.

55- S. Doeleman et al., "Event-Horizon-Scale Structure in the Supermassive Black Hole Candidate at the Galactic Center," *Nature* 455 (2008): 78-80.

56- T. Johannsen et al., "Testing General Relativity with the Shadow Size of SGR A*," *Physical Review Letters* 116 (2016): 031101.

الفصل السابع: الرؤية بعيني الجاذبية

1- F. G. Watson, *Stargazer: The Life and Times of the Telescope* (Cambridge, MA: De Capo Press, 2005).

2- P. Morrison, "On Gamma-Ray Astronomy," *Il Nuovo Cimento* 7 (1958): 858-65.

3- Four prominent examples are A. A. Abdo et al., "Fermi-LAT Observations of Markarian 421: the Missing Piece of its Spectral Energy Distribution," *Astrophysical Journal* 736 (2011): 131-53; V. A. Acciari et al., "The Spectral Energy Distribution of Markarian 501: Quiescent State Versus Extreme Outburst," *Astrophysical Journal* 729 (2011): 2-11; V. S. Paliya, "A Hard Gamma-Ray Flare from 3C 279 in December 2013," *Astrophysical Journal* 817 (2016): 61-75; and S. Soldi et al., "The Multiwavelength Variability of 3C 273," *Astronomy and Astrophysics* 486 (2008): 411-27.

4- For the sake of the analogy, let's momentarily suspend our disbelief, take a materialist view of mind and brain, and imagine that one day we can use remote sensing to parse thoughts.

5- Gravitational waves do not occur, however, when the motion is perfectly symmetric, like an expanding or contracting sphere, or rotationally symmetric, like a spinning disk or sphere. A perfectly symmetric supernova collapse or a perfectly spherical spinning neutron star would not emit gravitational waves. To put it technically, the third time derivative of the quadrupole moment in the stress-energy tensor must be nonzero for a system to emit gravitational radiation. In mathematical terms, this is analogous to the changing dipole moment of charge or current that leads to electromagnetic radiation. Got it?

6- P. G. Bergmann, *The Riddle of Gravitation* (New York: Charles Scribner's Sons, 1968).

7- It's an assumption and a supposition that gravity and gravitational waves propagate at the speed of light. No experiment to test this has ever been unequivocally successful. It's very difficult to design any experiment to "turn off" gravity or change it dramatically enough at a remote location to see how fast

it travels. In the standard model of particle physics, gravity is carried by a particle called the graviton, traveling at light speed. Gravitons have never been detected.

8- A. S. Eddington, "The Propagation of Gravitational Waves," *Proceedings of the Royal Society of London* 102 (1922): 268-82.

9- K. Daniel, "Einstein versus the *Physical Review*," *Physics Today* 58 (2005): 43-48.

10- A. Einstein and N. Rosen, "On Gravitational Waves," *Journal of the Franklin Institute* 223 (1937): 43-54

11- Gravity Research Foundation website, http://www.gravityresearchfoundation.org/origins.html.

12- I won't belabor this with economics references in an astronomy book, but there is an extensive literature to show that, while timing markets can work in certain sectors and for short periods of time, as a long-term strategy it is ruinous. Babson was simply lucky; it happens.

13- J. L. Cervantes-Cota, S. Galindo-Uribarri, and G. F. Smoot, "A Brief History of Gravitational Waves," *Universe* 2 (2016): 22-51.

14- M. Gardner, *Fads and Fallacies in the Name of Science* (New York: Dover, 1957), 93.

15- Despite its origin in pseudoscience and magical thinking, Babson's vision was in the end very positive. In time, the Gravity Research Foundation recaptured prestige in the eyes of the physics community. The 1957 conference in Chapel Hill is today known as the GR1 Conference. It began as a series of international conferences every few years to discuss the state of the art in gravitation and general relativity. As an indication of the international nature of the field, the last seven meetings were held in India, South Africa, Ireland, Australia, Mexico, Poland, and most recently, GR21 in New York.

16- Janna Levin, "Gravitational Wave Blues," https://aeon.co/essays/how-joe-weber-s-gravity-ripples-turned-out-to-be-all-noise.

17- Weber's concept was published in J. Weber, "Detection and Generation of Gravitational Waves," *Physical Review* 117 (1960): 306-13. The performance of his first operating detector was published six years later in J. Weber, "Observations of the Thermal Fluctuations of a Gravitational-Wave Detector," *Physical Review Letters* 17 (1966): 1228-30.

18- J. Weber, "Evidence for Discovery of Gravitational Radiation" *Physical Review Letters* 22 (1969): 1320-24, followed closely by J. Weber, "Anisotropy and Polarization in the Gravitational-Radiation Experiments," *Physical Review Letters* 25 (1970): 180-84.

19- I never met Weber, but I know his wife, Virginia Trimble, well. She's a fellow Brit and an expert on the history of astronomy, so we exchange astronomy arcana occasionally. In their long marriage, Virginia had a faculty job at the University of California in Irvine, so she spent half her year there and half back East where Weber had his faculty job. After he died in 2000, we met at a conference and talked about his work, and I could tell it was a painful subject. She had to watch him be denigrated and belittled by people who had no idea how hard he had worked to hone his technique. He continued his research for over twenty years after federal support was withdrawn. Virginia said it took a severe toll on him, emotionally and physically.

20- J. A. Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998), 257-58.

21- J. M. Weisberg, D. J. Nice, and J. H. Taylor, "Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16," *Astrophysical Journal* 722 (2010): 1030-34.

22- The binary system emits 7 x 10^{24} watts of gravitational radiation, and the distance between the two neutron stars shrinks by 3.5 meters per year. It will take 300 million years for the two neutron stars to collide and merge. Even the Solar System emits gravitational radiation, but far, far less, only 5,000 watts.

23- This is speculation, informed by the properties of the gravity waves detected when the black holes merged and by plausible formation scenarios that could lead to black holes this massive—more massive than any black holes in the local universe. Massive stars forming 11 billion years ago would have a much smaller proportion of heavy elements than the Sun, and models suggest their initial mass could be higher than stars forming now. As a result, these ancient stars would shed less mass and leave behind more massive black holes. This scenario is described in K. Belczynski, D.E. Holz, T. Bulik, and R. O'Shaughnessy, "The First Gravitational-Wave Source from the Isolated Evolution of Two Stars in the 40-100 Solar Mass Range," *Nature* 534 (2016): 512-15. A more radical possibility, not ruled out by the data, is that the black holes were primordial, formed in the early universe from dark matter; see S. Bird et al., "Did LIGO Detect Dark Matter," *Physical Review Letters* 116 (2016): 201301-07.

24- J. Chu, "Rainer Weiss on LIGO's Origins," oral history, Massachusetts Institute of Technology Q & A News series, http://news.mit.edu/2016/rainer- weiss-ligo-origins-0211.

25- Weiss credits his students and also Phillip Chapman, an MIT researcher who went to work for NASA and then stopped working on gravity and physics. Intriguingly, and ironically, the antecedent for the interferometer was Joseph Weber, who suggested the idea to his former student Robert Forward in 1964. Forward used funds from his employer, Hughes Research Lab, to build a prototype interferometer with 8.5-meter-long arms. After 150 hours of observations, he detected

nothing. Confirming the "small world" nature of the gravitational physics community, Forward credited conversations with Rainer Weiss in a footnote to his paper, R. L. Forward, "Wide-Band Laser-I nterferometer Gravitational-Radiation Experiment," *Physical Review D* 17 (1978): 379-90.

26- R. Weiss, "Quarterly Progress Report, Number 102, 54-76," Research Laboratory of Electronics, MIT, 1972, http://dspace.mit.edu/bitstream/ handle/1721.1/RLE_QPR_105_V.pdf?sequence=1.

27- Quoted in J. Levin, *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space* (New York: Knopf, 2016).

28- Quoted in N. Twilley, "Gravitational Waves Exist: The Inside Story of How Scientists Finally Found Them," *New Yorker*, February 11, 2016, http://www.newyorker.com/tech/elements/gravitational-waves-exist-heres-how-scientists-finally-found-them.

29- More specifically, they were the best in the United States. In this LIGO- centric narrative, I omit for simplicity the substantial early efforts of other groups and other countries. Drever's group at the University of Glasgow kept up their work on interferometers after he left for Caltech. Meanwhile, a group led by Peter Kafka in Germany learned about Weiss's work in 1974 and hired one of his students to build interferometers. They collaborated with an Italian group to build 3-meter and 30-meter prototypes over the next decade. Interestingly, in a demonstration of the "small world" phenomena of gravitational wave research, Drever had first learned about interferometers at a lecture by Peter Kafka in 1975. The German group and the Scottish group combined to propose a kilometer-scale instrument in the mid-1980s but it wasn't funded. Eventually they were able to build a 600-meter instrument, which started operations in 2001 and was a critical test-bed for LIGO detectors and techniques. The French had ideas for an even

more ambitious interferometer, led by Alain Brillet, who had worked with Weiss at MIT in the early 1980s. The Virgo project started taking data in 2004 and has been in a full partnership with LIGO for a decade. The details of worldwide efforts to detect gravitational waves are given in J. L. Cervantes-Cota, S. Galindo-Uribarri, and G. F. Smoot, "A Brief History of Gravitational Waves," *Universe* 2 (2016): 22-51.

30- P. Linsay, P. Saulson, and R. Weiss, "A Study of a Long Baseline Gravitational Wave Antenna System," 1983, https://dcc.ligo.org/public/0028/T830001/000/NSF_bluebook_1983.pdf.

31- LIGO reports and newsletters don't convey these tensions. They understandably have a mostly valedictory tone given the ultimate success of the project. The best insider-outsider account is contained in Janna Levin's book *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space* (New York: Knopf, 2016).

32- A. Cho, "Here is the First Person to Spot Those Gravitational Waves," *Science,* February 11, 2016, http://www.sciencemag.org/news/2016/02/here-s-first-person-spot-those-gravitational-waves.

33- Quoted in Josn Rottenberg, "Meet the Astrophysicist Whose 1980 Blind Date Led to *Interstellar*;" *Los Angeles Times,* November 21, 2014, http://www.latimes.com/local/great-reads/la-et-c1-kip-thorne-interstellar-20141122-story.html.

34- Academic lineages exist in all fields but they are particularly strong in theoretical physics and mathematics. A career can be shaped and launched by having the right thesis advisor and students who reflect well on their advisors. In theoretical fields, the influence of an advisor can extend to "taste" in choosing a problem to solve and the "style" with which it is solved. These aesthetic considerations are often opaque to an outsider. Kip Thorne has mentored fifty PhD students as a professor at Caltech, including many influential figures in the-

oretical astrophysics and relativity such as Alan Light- man, Bill Press, Don Page, Saul Teukolsky, and Clifford Will.

35- "How Are Gravitational Waves Detected?" Q & A with Rainer Weiss and Kip Thorne, *Sky and Telescope,* August 28, 2016, http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resourc-es/astron omy-ques tions-answers/science-faq-answers/kav-li-how-gravitational-waves-detected/.

36- K. S. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (New York: W. W. Norton, 1994).

37- See Adam Rogers, "Wrinkles in Spacetime: The Warped Astrophysics of Interstellar," *Wired,* https://www.wired.com/2014/10/astrophysics-interstellar-black-hole/

38- J. Updike, "Cosmic Gall," *New Yorker,* December 17, 1960, 36.

39- K. S. Thorne, "Gravitational Radiation," in *Three Hundred Years of Gravitation,* edited by S. Hawking and W. W. Israel (Cambridge: Cambridge University Press, 1987), 330-458.

40- This information is laid out clearly and graphically in the *LIGO Magazine,* no. 8, March 2016, http://www.ligo.org/magazine/LIGO-magazine-issue-8.pdf.

41- This will be a critical advance, as it's impossible to identify the sources of LIGO black hole signals so far. Gravitational waves represent a new way of looking at the universe so it's frustrating not to be able to identify the objects responsible and observe them with light and across the electromagnetic spectrum. There are other details of the detection process that affect the interpretation of the data. Interferometers are most sensitive to the waves that arrive from above, since they are stretching and squeezing within the transverse plane. At any other angle the signal is less. With two detectors separated by thousands of miles, they are not co-planar due to the curvature of the Earth, so that must be taken into account too. The signal

is largest for a binary orbit with a plane that faces the Earth, and lower for other inclinations. LIGO experimenters must extract every iota of information possible from each of their transient events.

42- In terms of the peculiar arithmetic that applies to merging black holes, the first event involved the sum 36 + 29 = 62 solar masses, with 3 solar masses emitted as gravitational waves. The second event involved the sum 14 + 9 = 21 solar masses, with 2 solar masses emitted as gravitational waves, and the "candidate" event involved the sum 23 + 13 = 34 solar masses, with 2 solar masses emitted as gravitational waves. The detection significance of the three events was >5.3 a for the first two, and a marginal 1.7a for the candidate event. Localization on the sky depends on signal strength; it was 230 square degrees for the first event, 850 square degrees for the second event, and 1600 square degrees for the candidate event. In general, the characteristic chirp frequency scales with the black hole mass as $M^{-5/8}$ and the displacement in the interferometer, h, scales with the black hole mass as $M^{5/3}$. All these measurements, and more, are in the *LIGO Magazine*, no. 9, August 2016, http://www.ligo.org/magazine/LIGO-magazine-issue-9.pdf.

43- A. Murguia-Merthier et al., "A Neutron Star Binary Merger Model for GW170817/GRB 170817A/SSS17a," *Astrophysical Journal Letters* 848 (2017): L34-42.

44- M. R. Seibert et al., "The Unprecedented Properties of the First Electromagnetic Counterpart to a Gravitational-Wave Source," *Astrophysical Journal Letters* 848 (2017): L26-32.

45- J. Abadie et al., "Predictions for the Rates of Compact Binary Coalescences Observable by Ground-Based Gravitational-Wave Detectors," *Classical Quantum Gravity* 27 (2010): 173001-26.

46- B. P. Abbott et al., "The Rate of Binary Black Hole Merg-

ers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914," *Astrophysical Journal Letters* 833 (2016): L1-99. Advanced LIGO working in conjunction with the VIRGO interferometer in Europe will deliver source positions of 5 square degrees, 100 times more accurate than the early LIGO detections.

47- LISA was originally a joint project of NASA and ESA. Initial design studies date back to the 1980s. But NASA ran into budget problems and withdrew from the project in 2011, so ESA went from being a partner to being the sole agency sponsoring this ambitious mission. LISA is a major new mission in ESA's "Cosmic Vision" program, with a tentative launch date of 2034. See https://www.elisascience.org/news/top-news/gravitationaluniverseselectedasl3.

48- M. Armano et al., "Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results," *Physical Review Letters* 116 (2016): 231101-11.

49- Analogous to the situation for stellar mass black holes, the most difficult problem to understand is the timescale of the final merger. The difficulty of the supermassive black holes losing enough angular momentum to merge is called the "final parsec" problem. In a gas-rich galaxy the final merger phase might take 10 million years, but in a gas-poor galaxy it might take billions of years. In some models, it might take longer than the age of the universe, meaning that massive galaxies might contain binary supermassive black holes that have never merged—which, in turn, would mean that there would be no gravitational wave signal to detect.

50- J. Salcido et al., "Music from the Heavens: Gravitational Waves from Super- massive Black Hole Mergers in the EAGLE Simulations," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463 (2016): 870-85.

51- G. Hobbs, “Pulsars as Gravitational Wave Detectors,” in *High Energy Emission from Pulsars and Their Systems,* Astrophysics and Space Science Proceedings (Berlin: Springer, 2011), 229-40.

52- S. R. Taylor et al., “Are We There Yet? Time to Detection of Nano-Hertz Gravitational Waves Based on Pulsar-Timing Array Limits,” *Astrophysical Journal Letters* 819 (2016): L6-12.

53- A. Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins* (New York: Perseus, 1997).

54- P. D. Lasky et al., “Gravitational Wave Cosmology Across 29 Decades in Frequency,” *Physical Review X* 6 (2016): 011035-46.

55- Technically, this pattern is called B-mode polarization. It means that the electromagnetic field has a pattern like a vortex superimposed. The temperature of the microwaves is uniform across the sky to one part in 100,000, and the polarization signal is 100 times smaller, so detecting the gravitational wave effect requires an extraordinary level of precision.

56- D. Hanson et al., “Detection of B-Mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope,” *Physical Review Letters* 111 (2014): 141301-07.

الفصل الثامن: مصير الثقوب السوداء

1- Fermions are half-integer spin particles that obey statistics defined by Enrico Fermi and Paul Dirac in the 1930s. No two fermions can have exactly the same set of quantum properties. Fundamental fermions include the electron and the six types of quark. Composite fermions include protons and neutrons. Bosons are integer spin particles that obey statistics defined by Albert Einstein and Satyendra Bose in the 1920s. Fundamental bosons include the photon, the Higgs boson, and the (still

hypothetical) graviton. Composite bosons include the helium nucleus and the carbon nucleus. Any number of bosons can have the same quantum state. While fermions are thought of as particles and bosons as force carriers, the distinction between those two categories in quantum mechanics is not clear-cut.

2- Note that the idea of extra dimensions is not necessarily a reason to doubt string theory as a description of nature. The mathematics of multidimensional spaces were worked out in the middle of the nineteenth century by Gauss and Bolyai. In the 1920s, Kaluza and Klein did early work on a theory of gravity that incorporated an extra dimension. String theory is still a very active field of theoretical physics, and progress has been made, but there's also been a backlash. For the positive view of string theory's beauty and potential as a theory of everything, see B. Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (New York: W. W. Norton, 2003). For a countervailing view, see L. Smolin, *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next* (New York: Houghton Mifflin, 2006).

3- In a nonrotating black hole the singularity is a point, and in a rotating black hole it is a ring. To a physicist a ringlike singularity is no less distasteful than a pointlike singularity because it still has infinite space-time curvature at every point along its circumference.

4- J. Womersley, "Beyond the Standard Model," *Symmetry,* February 2005, 22-25. A slightly more technical article with the same title is J. D. Lykken, "Beyond the Standard Model," a lecture given at the 2009 European School of High Energy Physics, *CERN Yellow Report CERN-2010-0002* (Geneva: CERN, 2011), 101-09.

5- L. Randall and R. Sundrum, "An Alternative to Compactification," *Physical Review Letters* 83 (1999): 4690-93.

6- L. Randall, *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (New York: Ecco, 2005).

7- M. Holloway, "The Beauty of Branes," *Scientific American* 293, November 2005, 38-40.

8- L. Randall, "Theories of the Brane," in *The Universe: Leading Scientists Explore the Origin, Mysteries, and Future of the Cosmos,* edited by J. Brockman (New York: HarperCollins, 2014), 62-78.

9- e. e. cummings, "Pity this busy monster, manunkind," in e. e. *cummings: Complete Poems 1904-1962* (New York: W. W. Norton, 1944).

10- J. Neilsen et al., "The 3 Million Second Chandra Campaign on Sgr A*: A Census of X-ray Flaring Activity from the Galactic Center," in *The Galactic Center: Feeding and Feedback in a Normal Galactic Nucleus*, Proceedings of the International Astronomical Union, vol. 303 (2013): 374-78.

11- M. Nobukawa et al., "New Evidence for High Activity of the Super-Massive Black Hole in our Galaxy," *Astrophysical Journal Letters* 739 (2011): L52-56.

12- F. Nicastro et al., "A Distant Echo of Milky Way Central Activity Closes the Galaxy's Baryon Census," *Astrophysical Journal Letters* 828 (2016): L12-20.

13- 'Chandra Finds Evidence for Swarm of Black Holes Near the Galactic Center," NASA press release, January 10, 2005, http://chandra.harvard .edu/ press/05_releases/press_011005. html.

14- D. Haggard et al., "The Field X-ray AGN Fraction to z = 0.7 from the Chandra Multi-Wavelength Project and the Sloan Digital Sky Survey," *Astrophysical Journal* 723 (2010): 1447-68.

15- R. P. van der Marel et al., "The M31 Velocity Vector: III. Fu-

ture Milky Way- M31-M33 Orbital Evolution, Merging, and Fate of the Sun," *Astrophysical Journal* 753 (2012): 1-21.

16- T. J. Cox and A. Loeb, "The Collision Between the Milky Way and Andromeda," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 386 (2007): 461-74.

17- Study of M31 is complicated by the fact that it has a double nucleus within a dense star cluster. The brighter of the two concentrations is offset from the center of the galaxy, and the fainter one, 5 light years away, contains the massive black hole. The distance of 2.5 million light years makes the nuclear regions difficult to study in detail even with the Hubble Space Telescope. The best measurement of the black hole mass is in the range 110 to 230 million solar masses. See R. Bender et al., "HST STIS Spectroscopy of the Triple Nucleus of M31: Two Nested Disks in Keplerian Rotation Around a Supermassive Black Hole," *Astrophysical Journal* 631 (2005): 280-300.

18- J. Dubinski, "The Great Milky Way-Andromeda Collision," *Sky and Telescope,* October 2006, 30-36. A more technical treatment is F. M. Khan et al., "Swift Coalescence of Supermassive Black Holes in Cosmological Mergers of Massive Galaxies," *Astrophysical Journal* 828 (2016): 73-80. The theory of how the final merger takes place is uncertain; see M. Milosavljevic and D. Merritt, "The Final Parsec Problem," in *The Astrophysics of Gravitational Wave Sources,* AIP Conference Proceedings, vol. 686 (2003): 201-10.

19- F. Khan et al, "Swift Coalescence of Supermassive Black Holes in Cosmological Mergers of Massive Galaxies," *Astrophysical Journal* 828 (2016): 73-81.

20- T. Liu et al., "A Periodically Varying Luminous Quasar at z = 2 from the PAN-STARRS1 Medium Deep Survey: A Candidate Supermassive Black Hole in the Gravitational Wave-Driven Regime," *Astrophysical Journal Letters* 803 (2015): L16-21.

21- K. Thorne, *The Science of Interstellar* (New York: W. W. Norton, 2014).

22- W. Zuo et al., "Black Hole Mass Estimates and Rapid Growth of Supermassive Black Holes in Luminous z = 3.5 Quasars," *Astrophysical Journal* 799 (2014): 189-201.

23- G. Ghisellini et al., "Chasing the Heaviest Black Holes of Jetted Active Galactic Nuclei," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 405 (2010): 387-400.

24- K. Inayoshi and Z. Haiman, "Is There a Maximum Mass for Black Holes in Galactic Nuclei?," *Astrophysical Journal* 828 (2016): 110-17.

25- D. Sobral et al., "Large H-Alpha Survey at z = 2.23, 1.47, 0.84, and 0.40: The 11 Gyr Evolution of Star-forming Galaxies from HiZELS," *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* 428 (2013): 1128-46.

26- F. C. Adams and G. Laughlin, "A Dying Universe: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects," *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 337-72.

27- A. Burgasser, "Brown Dwarfs: Failed Stars, Super Jupiters," *Physics Today,* June 2008, 70-71.

28- D. N. Spergel, "The Dark Side of Cosmology: Dark Matter and Dark Energy," *Science* 347 (2015): 1100-02.

29- Astronomers have wondered how future inhabitants of Milkomeda would know they lived in an expanding universe if there were no galaxies visible by which to measure redshifts. After a trillion years the expansion will have progressed so far that the microwaves left over from the big bang will have left the event horizon. It seems that the only evidence of the universe beyond Milkomeda will be hypervelocity stars continuously being ejected from Milkomeda and all other galaxies at close to the speed of light. This possibility is described in

A. Loeb, "Cosmology with Hypervelocity Stars," *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 4 (2011): 23-29.

30- F. Adams and G. Laughlin, *The Five Ages of the Universe* (New York: Free Press, 1999).

31- H. Nishino, Super-K Collaboration, "Search for Proton Decay in a Large Water Cerenkov Detector," *Physical Review Letters* 102 (2012): 141801-06.

32- J. Baez, "The End of the Universe," http://math.ucr.edu/home/baez/end.html.

33- W. B. Yeats, "The Second Coming" (1919), in *The Classic Hundred Poems* (New York: Columbia University Press, 1998).

34- A. Eddington, *The Nature of the Physical World: Gifford Lectures of 1927* (Newcastle-upon-Tyne: Cambridge Scholars, 2014).

35- B. W. Jones, *Life in Our Solar System and Beyond* (Berlin: Springer, 2013).

36- The Extrasolar Planets Encyclopedia is continuously updated, http://exoplanet.eu/.

37- R. Jayawardhana, *Strange New Worlds: The Search for Alien Planets and Life Beyond our Solar System* (Princeton: Princeton University Press, 2013).

38- A. Cassan et al., "One or More Bound Planets per Milky Way Star from Microlensing Observations," *Nature* 481 (2012): 167-69.

39- F. J. Dyson, "Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe," *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 447-60.

40- M. Bhat, M. Dhurandhar, and N. Dadhich, "Energetics of the Kerr-Newman Black Hole by the Penrose Process," *Journal of Astronomy and Astrophysics* 6 (1985): 85-100.

41- T. Opatrny, L. Richterek, and P. Bakala, "Life Under a Black Sun," 2016, https://arxiv.org/abs/1601.02897.

42- F. J. Dyson, "Search for Artificial Stellar Sources of Infra-Red Radiation," *Science* 131 (1960): 1667-68.

علم الثقوب السوداء المذهل، ودور تلك الثقوب السوداء في فهم ماضي كوننا ومستقبله

الثقوب السوداء هي الأجسام الأكثر تطرُّفًا في الكون، لكنها مع ذلك منتشرة في كل مكان. فكل نجم ضخم يخلِّف وراءه ثقبًا أسود عند وفاته، وتأوي كل مجرة ثقبًا أسود ضخمًا في مركزها. وعلى نحو غامض مخيف تواصل هذه الأجرام العملاقة المظلمة إدهاش العلماء، حتى الذين يمضون حياتهم المهنية في دراستها. ما الذي تشكَّل أولًا، المجرة أم ثقبها الأسود المركزي؟ ماذا سيحدث إذا دخلتَ في إحدى هذه الثقوب السوداء؛ الموت الفوري أم شيء أكثر غرابة؟ بل ربما كان السؤال الأكثر أهمية هو: كيف لنا أن نعرف أي شيء عن تلك الثقوب السوداء يقينًا، هي بطبيعتها تقوم بتدمير المعلومات؟

في هذا الكتاب، يصحب عالم الفلك الشهير «كريس إمبي» القُرَّاء في رحلة استكشافية لهذه الأسئلة وغيرها من خلال أحدث ما توصلت إليه الفيزياء الفلكية، وكذلك دور تاريخ الثقوب السوداء في الفيزياء النظرية، من تأكيد معادلات نسبية أينشتاين العامة إلى اختبار نظرية الأوتار. فيمزج هذا التاريخ بسرد مثير للظواهر التي شهدها العلماء أثناء رصد الثقوب السوداء، كدوران النجوم واحتشادها كأسراب النحل حول مركز مجرتنا، والثقوب السوداء التي تؤدي رقصة جاذبية مع النجوم المرئية، والصدام المدوي بين ثقبين أسودين، الذي يطلق التموجات في الزمكان.

ويكشف هذا الكتاب على نحو واضح وجذاب وعميق كيفية ارتباط فهمنا للثقوب السوداء ارتباطًا جوهريًا بطريقة فهمنا للكون وموقعنا داخله، فمن أبسط الأسئلة إلى أشدها تعقيدًا - من أصغر الجسيمات إلى طبيعة الزمكان نفسه - ربما تكون الثقوب السوداء هي مفتاح الفهم الأعمق للكون.

كريس إمبي

أستاذ متميز في قسم علم الفلك بجامعة أريزونا ومؤلف كتب «How It Began» و«Beyond» و«How It Ends»، وأربعة كتب أخرى، بالإضافة إلى كتابين دراسيين في علم الفلك، ويعيش في توسان بأريزونا.

